L'ARCHITETTURA DELLE COSE

SIR WILLIAM BRAGG
Direttore della Royal Institution
PREMIO NOBEL

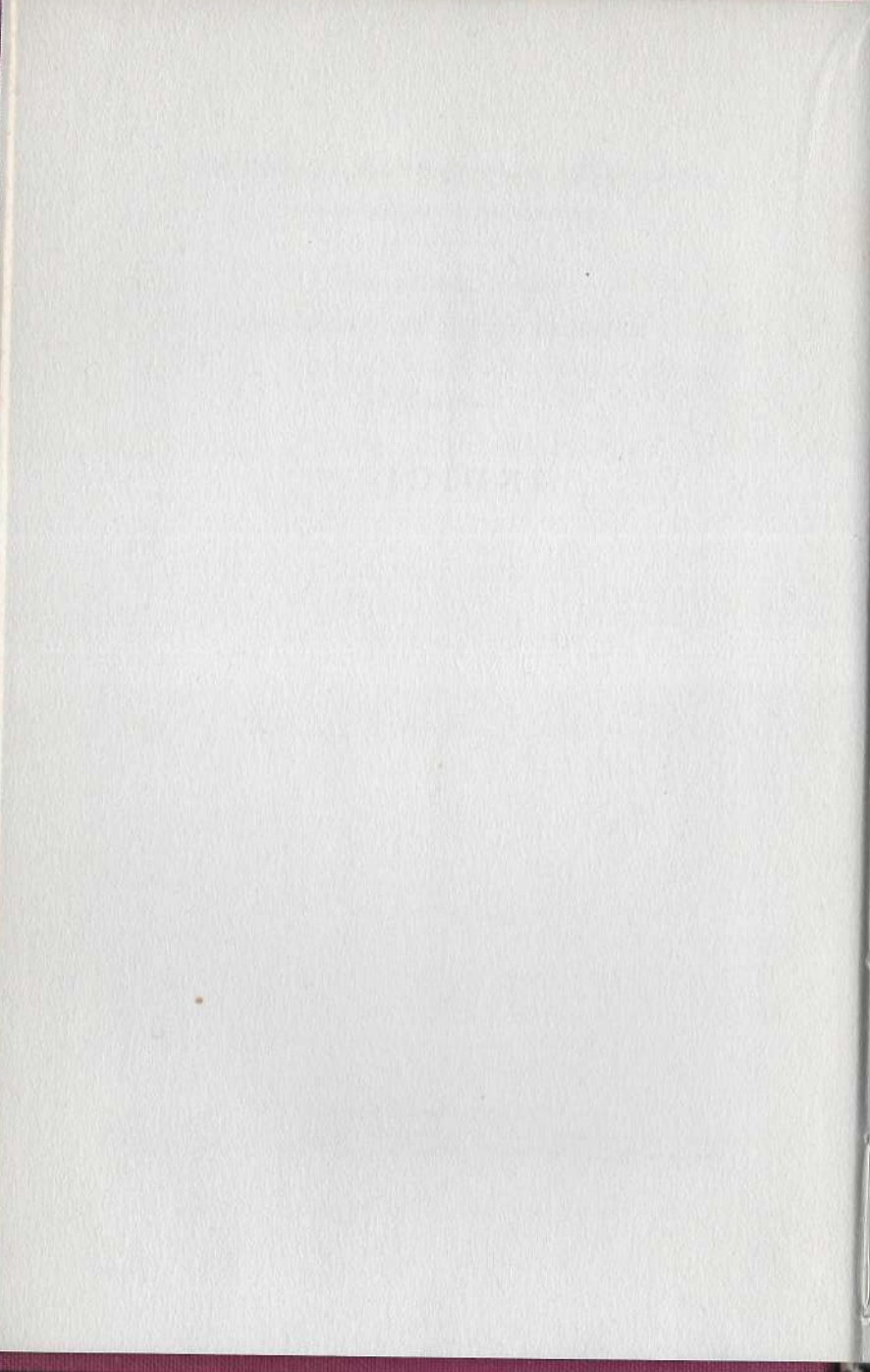
L'ARCHITETTURA DELLE COSE

*

DAGLI ATOMI AI CRISTALLI

*

Traduzione dall'inglese del
DOTT. ING. CARLO ROSSI

A. MONDADORI · MILANO

INDICI

INDICE DEL TESTO

Prefazione 11

Cap. I

Gli atomi, di cui sono fatte le cose . . . 13

Cap. II

La natura dei gas 53

Cap. III

La natura dei liquidi 95

Cap. IV

La natura dei cristalli: il diamante . . . 129

Cap. V

La natura dei cristalli: ghiaccio e neve . . 173

Cap. VI

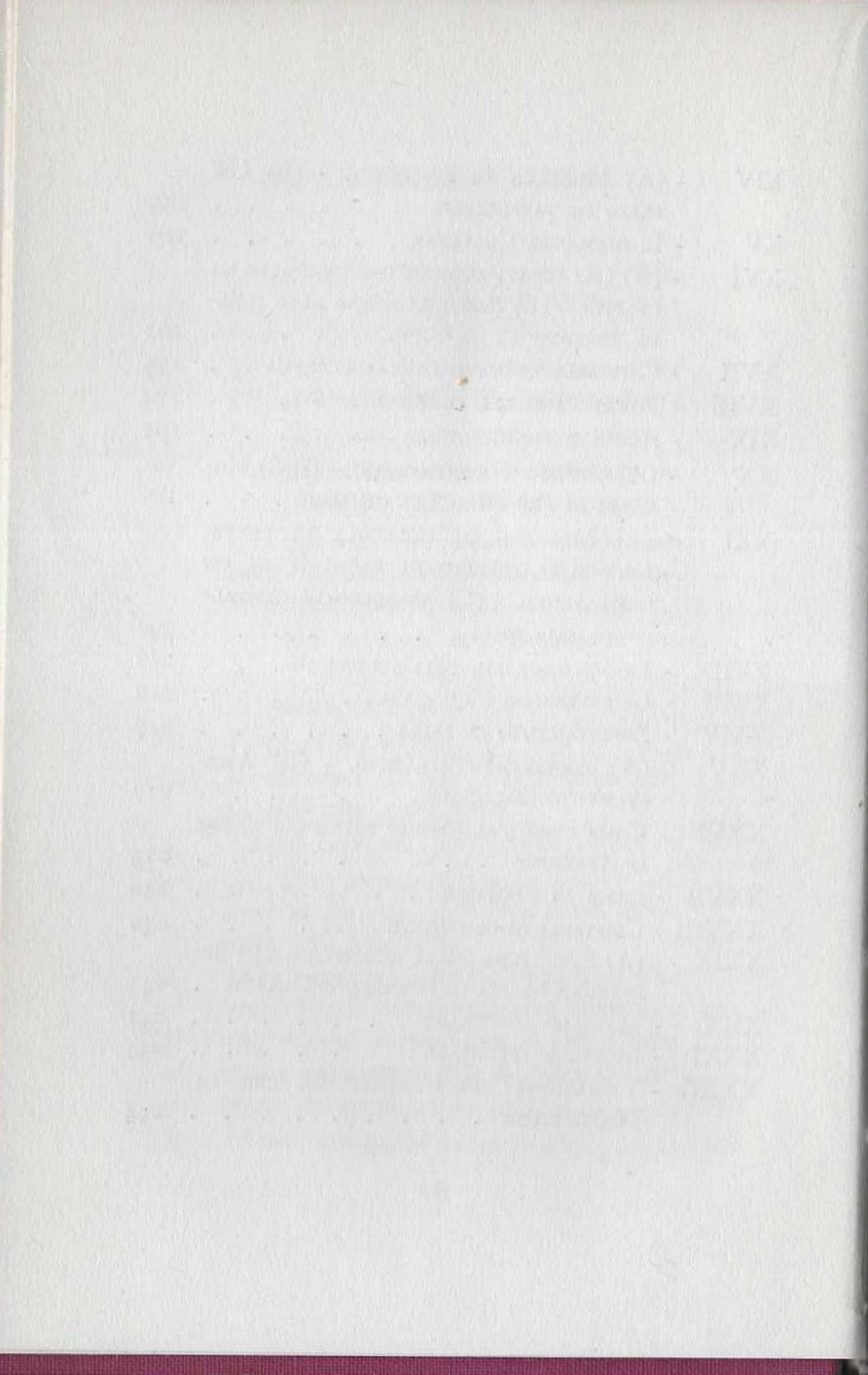
La natura dei cristalli: i metalli 215

Cap. VII

Le piú recenti conquiste 249

INDICE DELLE TAVOLE

I - (A) Modello del cristallo di bismuto. - (B) Il dispositivo per scuotere la sabbia nel recipiente 24
II - Apparecchio di Shimizu-Wilson per l'osservazione dei raggi radioattivi . 33
III - Tracce delle particelle « alfa » . . 40
IV - (A) Barre magnetizzate sostenute da molle spirali. - (B) Modelli atomici . 41
V - (A) Magneti galleggianti. - (B) Cristalli in un tubo contenente emanazione del radio 49
VI - (A) Un diapason su un tubo di vetro. - (B) Apparecchio per produrre la nebbia 65
VII - Fumo di sigaretta 72
VIII - Esperimenti per la dimostrazione della pressione atmosferica 73
IX - Cavità causanti l'erosione delle eliche 104
X - (A) Una grossa goccia di orto-toluidina nell'acqua. - (B) Due bolle di sapone una nell'altra 105
XI - (A) Circoli prodotti da goccioline d'olio. - (B) Il battellino alla canfora . 113
XII - (A) Acqua in burrasca. - (B) L'olio calma le onde. - (C) Acini d'uva in acqua di seltz 120
XIII - Forme cristalline 136

XIV - (A) Modello di diamante. - (B) Un pezzo di tappezzeria 145
XV - Il diamante Cullinan 160
XVI - (A) Gli strati atomici del cristallo di grafite. - (B) Possibili forme dell'anello benzenico 161
XVII - Cristalli di neve di varia forma . . 174
XVIII - Altri cristalli di neve 174
XIX - Aloni e parelii 174
XX - (A) Ghiaccio di ghiacciaio. - (B-C) Modelli di struttura del ghiaccio . . . 185
XXI - (A) Modello di molecola di pentano. - (B) Spettro di raggi X di un idrocarburo. - (C) Modello di cristallo di salgemma 200
XXII - Due fotografie dell'alluminio . . . 216
XXIII - La superficie d'un acciaio 216
XXIV - Assestamento di palle 217
XXV - (A) Assestamento cubico. - (B) Assestamento esagonale 217
XXVI - Come cede l'alluminio sotto gli sforzi di trazione 225
XXVII - Lame di Damasco 240
XXVIII - Cristalli di cementite 240
XXIX - (A) Struttura della cementite. - (B) Superficie polita di metallo speculare . 241
XXX - Metallo speculare 241
XXXI - Metallo speculare 244
XXXII - Variazione della resistenza con la temperatura 244

PREFAZIONE

Questo libro è nato da una serie di conferenze che l'autore tenne anni or sono alla Royal Institution di Londra.

Ha finora avuto sei edizioni inglesi e varie altre in altre lingue.

Abbiamo creduto utile presentarlo anche al pubblico italiano.

Sir William Bragg, di cui sono note le grandi benemerenze nel campo dell'analisi cristallografica, ha brillantemente dimostrato con quest'opera come sia possibile conciliare il rigore dell'esposizione scientifica e la trattazione di argomenti fisici, talora apparentemente aridi e complessi, con la necessità di avvicinarsi quanto possibile al modo di pensare del gran pubblico, cogliendo continuamente gli esempi illustrativi nella vasta messe delle esperienze quotidiane.

Egli ha in tal modo disceso dai loro piedestalli molti concetti estremi della fisica delle cose ed applicandoli ai fenomeni piú familiari ha intessuto le piú amabili delle conversazioni scientifiche, ove non sembra affatto di aver a che fare con quegli stessi argomenti che al profano riescono sovente cosí oscuri e difficili quando apre certi testi d'insegnamento della fisica che vanno per la maggiore.

Anche gli studenti potranno di conseguenza leggere con utilità questo libro, pensato e scritto per chi ama imparare.

Il capitolo settimo, che dà notizia sulle scoperte piú recenti dell'analisi della materia coi raggi X, è stato scritto appositamente per l'edizione italiana.

IL TRADUTTORE

Capitolo Primo

GLI ATOMI, DI CUI SONO FATTE LE COSE

Sono ormai duemila anni dacché Tito Lucrezio Caro, filosofo latino, trattò della costituzione della materia nel suo *De rerum natura*. In questo poema l'aria, l'acqua, la terra e tutte le altre cose di questo mondo erano ritenute costituite da innumerevoli particelle o corpuscoli in continuo, rapidissimo moto e tanto minuti da risultare perfettamente invisibili all'occhio umano. Secondo Lucrezio questa ipotesi era sufficiente a spiegare tutte le proprietà della materia. In realtà i principî esposti nel suo poema non erano suoi; egli cercava soltanto di spiegare le teorie di una certa scuola filosofica, da lui ritenute rispondenti al vero. Esisteva però anche una corrente opposta di idee, secondo la quale, per quanto profondamente si penetrasse nell'intimo delle cose, non sarebbe possibile scoprire l'esistenza di una struttura: supposto di suddividere l'acqua contenuta in un recipiente in singole goccie, queste di nuovo in altre goccie piú piccole e cosí via, anche le piú minute particelle d'acqua che si potessero ottenere sarebbero pur sempre acqua identica in tutte le sue proprietà a quella contenuta nel recipiente. Secondo Lucrezio invece, spingendo sufficientemente oltre questa suddivisione, si giungerebbe infine a corpu-

scoli indipendenti, agli atomi. La parola atomo vuole appunto dire che non si può ulteriormente dividere.

Fra questi due modi di vedere vi è una differenza sostanziale. Secondo gli uni sarebbe perfettamente inutile indagare piú a fondo la struttura delle sostanze, poiché, per quanto oltre si procedesse, non si giungerebbe a nulla di nuovo. Secondo gli altri invece, la natura delle cose, come noi la conosciamo, dipenderebbe dalle proprietà degli atomi che le compongono, epperciò sarebbe molto interessante ed importante di stabilire come questi atomi sono fatti. Questo secondo modo di vedere si è poi dimostrato essere molto piú vicino alla realtà che non il primo.

Non bisogna però credere che Lucrezio avesse un concetto di teorie atomiche del tipo oggi esistente. Egli non immaginava che vi fossero tante specie differenti di atomi e che gli atomi di una data specie fossero tutti eguali tra di loro. Questa nozione è relativamente recente: John Dalton la espose con grande chiarezza al principio del diciannovesimo secolo. Essa ha reso possibili i grandi progressi che la chimica e le altre scienze che in qualche modo da essa dipendono hanno realizzato nei tempi moderni. È facile capire come la nuova idea abbia grandemente semplificato le cose: perché abbiamo da fare soltanto con un numero limitato di specie atomiche e non con un numero sterminato di individui diversi tra loro. Immaginatevi che disperazione sareb-

be se fossimo costretti a studiare un gran numero d'atomi differenti, per esempio in un pezzo di rame! Ma se scopriamo che in un simile pezzo di rame puro esiste una sola specie atomica e che in tutto il mondo, di queste specie, non ve ne sono molte, possiamo, pieni di entusiasmo e speranza, passare allo studio delle proprietà degli atomi ed alla determinazione delle leggi secondo le quali questi si combinano tra di loro. Poiché, indubbiamente, la loro importanza sta nelle loro combinazioni. Gli atomi sono paragonabili alle lettere dell'alfabeto che si possono combinare nei piú varî modi a formar parole. Analogamente gli atomi si uniscono con egual varietà a formare quei gruppi che chiamiamo molecole. Possiamo persino spingere un po' oltre l'analogia e dire: come l'associazione di parole in frasi permette d'esprimere ogni sorta di pensieri, cosí la combinazione di molecole di tutti i generi e in tutte le proporzioni dà luogo a configurazioni e sostanze infinitamente varie d'aspetto e proprietà e che possono essere i portatori di ciò che si chiama vita.

Cosí mancò alla teoria atomica di Lucrezio l'idea essenziale che era necessaria per un ulteriore sviluppo e progresso. Perciò la teoria languí e la parola atomo venne usata in senso molto vago e scorretto ad indicare semplicemente ed unicamente qualche cosa di molto piccolo. Lucrezio ebbe invece, con la sua teoria atomica, un singolare successo in un senso del

tutto diverso. Egli suppose infatti che le malattie infettive venissero diffuse da piccolissime particelle materiali. Nel Rinascimento il filosofo e medico Fracastoro divenne un fervente assertore di questa teoria atomica delle infezioni; ma dopo di lui il segreto della batteriologia ripiombò nell'oblio, finché venne di nuovo svelato da Pasteur.

Possiamo immaginarci la Natura come un architetto che costruisca tutte le cose che vediamo con un numero limitato di diverse specie atomiche; proprio come un ingegnere costruisce un edificio con i piú varii ma determinati materiali: mattoni, pietre, tavole di legno, lastre di vetro, ecc. Esistono solo 92 sorte di atomi e di queste un numero considerevole viene usato soltanto occasionalmente. È meraviglioso che tutte le cose sulla Terra e nell'Universo, per quanto finora sappiamo, constino di cosí pochi elementi. L'Universo nella sua molteplicità di forme, la Terra e quanto su di essa dimora e si sviluppa, l'acqua dei mari, l'aria e le nuvole, tutti gli esseri viventi che si muovono sulla terraferma, in acqua e nell'aria, i nostri corpi con tutte le loro parti ed organi, la luna, il sole e le altre stelle, ogni singola cosa è costituita da queste poche specie di atomi. Noi non ci domanderemo ora qual è stata la loro origine, bensí soltanto come sono fatti: domanda che la scienza si pone da piú di cent'anni, da quando cioè cominciò ad intuire la loro straordina-

ria importanza. Quali sono le loro dimensioni e qual è la loro forma? Hanno forse caratteristiche analoghe a quelle dei corpi che ci sono familiari?

Ma prima di rispondere a queste domande dobbiamo far precedere una constatazione: in questi ultimi trent'anni abbiamo acquistato, per cosí dire, degli occhi nuovi. La scoperta della radioattività e quella dei raggi X hanno capovolta la situazione. Oggi possiamo capire molte cose che una volta erano oscure e vediamo aprirsi davanti a noi un nuovo meraviglioso mondo che incomincia ad essere esplorato. Come tutte le improvvise rivelazioni del vero, le nuove conoscenze illuminano la via percorsa e rendono facile la comprensione di quelle cose che in passato ci sembravano tanto difficili. Naturalmente anche la nuova strada non è priva di difficoltà: ma proprio queste risvegliano l'interesse ed eccitano alla ricerca. Cercheremo ora di fare qualche passo nel nuovo mondo, in modo da poter prendere parte alla conoscenza già acquisita e che aumenta sempre piú rapidamente giorno per giorno.

Torniamo dunque ai nostri atomi. Ancora prima dell'inizio del nuovo periodo era già stato risposto con notevole esattezza ad almeno una parte delle questioni che ad essi si riferiscono. Per esempio, Lord Kelvin aveva tenuto parecchie conferenze alla «Royal Institution» di Londra sulle proprietà degli atomi ed in particolare sulla loro grandezza. Mediante consi-

derazioni assai geniali egli giunse per via indiretta a conclusioni che oggi siamo in grado di verificare con grande esattezza; risulta ch'egli era giunto assai vicino alla verità. Naturalmente era assai piú difficile stabilire qual era la grandezza di un dato atomo che non quanto un atomo era piú grande di un altro. Si poterono per esempio paragonare grossolanamente tra loro le grandezze degli atomi di potassio e di carbonio determinando i pesi di eguali volumi di potassio solido e di diamante (che è formato da puro carbonio). Il potassio è piú leggero dell'acqua, il diamante invece tre volte e mezzo piú pesante dell'acqua. D'altra parte sappiamo dalla chimica che un atomo di potassio è circa tre volte piú pesante di un atomo di carbonio. Se ora supponiamo che in ambedue i casi gli atomi sieno impacchettati insieme nello stesso modo (ciò che oggi sappiamo essere vero soltanto in modo approssimato) dobbiamo concludere che gli atomi nel metallo potassio sono molto piú grandi di quelli di carbonio nel diamante, poiché, pur essendo singolarmente piú pesanti, sono aggruppati in modo da fornire un materiale piú leggero.

Assai piú difficile è farsi un'idea abbastanza esatta della effettiva grandezza di un atomo qualsiasi; tuttavia i quattro diversi ragionamenti di Lord Kelvin lo condussero press'a poco allo stesso risultato: « gli atomi o le molecole dell'ordinaria

materia debbono avere un diametro che varia all'incirca da 1/10 000 000 ad 1/100 000 000 di centimetro. Lord Kelvin espresse quest'opinione nel 1881; orbene i moderni metodi d'indagine ci dicono che gli atomi di carbonio nel diamante hanno un diametro di 1,54 centomilionesimi di centimetro e che gli atomi del metallo potassio ne hanno uno di 4,50

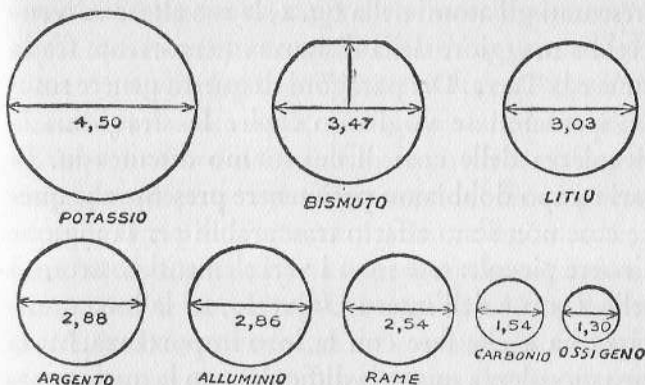



FIG. 1. Sezioni di alcuni atomi, in centomilionesimi di centimetro. Riguardo al bismuto vedasi pag. 10 e tavola I A.

centomilionesimi di centimetro. Come si vede la stima fatta da Lord Kelvin era meravigliosamente prossima alla realtà ad onta dei metodi indiretti ed inesatti di cui poteva unicamente disporre.

La fig. 1 mostra la sezione di alcuni atomi ingrandita 50 milioni di volte. I numeri inscritti nei cerchi dànno in ciascun caso la distanza, in centomilionesimi di centimetro, fra i centri di due atomi vicini

nella sostanza pura. Per esempio la distanza fra due atomi di carbonio nel diamante è di 1,54 centomilionesimi di centimetro. Nel caso dell'ossigeno il diametro è stato ricavato mediante calcolo dalla struttura cristallina di sostanze contenenti ossigeno. Se ingrandissimo la sala delle conferenze della «Royal Institution» nello stesso rapporto nel quale sono rappresentati gli atomi nella fig. 1, la sua altezza diventerebbe maggiore della distanza intercorrente fra la Luna e la Terra. Dei paragoni di questo genere sono indispensabili se vogliamo capire la straordinaria piccolezza delle cose di cui stiamo discutendo. In pari tempo dobbiamo però tenere presente che queste cose non sono affatto trascurabili per la ragione d'essere piccole: esse sono i veri elementi costruttivi della Terra e dell'intero Universo, né la loro grandezza ha a che fare con la loro importanza. Ma la loro piccolezza spiega la difficoltà con la quale penetriamo nella loro essenza quando alla fine ci siamo resi conto di ciò che rappresentano per noi. Ed il valore dei nuovi metodi di cui andremo discorrendo consiste appunto nel fatto ch'essi ci mettono in grado di trattare con gli atomi, per quanto piccoli questi sieno.

Ci siamo ora fatti un certo concetto della grandezza degli atomi; ma se procediamo oltre e ci domandiamo qual è la loro conformazione, la risposta non è piú cosí facile.

Il chimico, la cui scienza si occupa direttamente della combinazione degli atomi tra loro, ha raramente avuto bisogno di discuterne la forma e nelle sue formule di costituzione delle sostanze non dà loro alcuna particolare configurazione. La ragione di ciò non sta nel fatto che chimicamente la forma degli atomi non abbia alcuna importanza, ma piuttosto nell'impotenza dei vecchi metodi a determinarla. In un certo senso però il chimico presta molta attenzione alla forma. Gli atomi di una combinazione chimica devono trovarsi disposti in un determinato modo ed il tipo della disposizione è importante per le proprietà del composto. Se si potesse vedere e si volesse schizzare questa disposizione, si sarebbe obbligati di farlo in prospettiva. Specialmente con le combinazioni organiche è necessario concepire la loro struttura nello spazio. Non è sufficiente rappresentarle in piano, senza alcuna prospettiva; in verità nessun disegno piano può dare un concetto esatto di un complesso chimico. Noi siamo sfortunatamente costretti di usare il piano per le nostre rappresentazioni; dei modelli nello spazio, cioè a tre dimensioni, sono di costruzione costosa, mentre carta e matita sono a buon mercato. Ed è strano quale ostacolo questa semplice difficoltà tecnica oppone ad un convenevole sviluppo di una materia tanto importante. Ora se nello stabilire la disposizione di un atomo rispetto ai suoi vicini di-

ciamo che un atomo adiacente si deve trovare in questa direzione, qualora un altro si trovi in quest'altra direzione, noi attribuiamo effettivamente ai nostri atomi una forma. In ogni caso è tutto quello che possiamo ottenere in questo senso. Non possiamo fare di piú finché non conosceremo la struttura interna dell'atomo, quali sono le sue parti e come sono reciprocamente disposte.

Come ora vedremo, i nuovi mezzi d'indagine permettono di investigare molto piú dappresso la disposizione degli atomi; per la prima volta si è riusciti col loro aiuto a determinarne la reale reciproca distanza. Riteniamo assolutamente necessario di costruire dei modelli a tre dimensioni poiché, se ci limitiamo a disegnare sulla carta, corriamo il rischio di mancare in chiarezza. Se raffiguriamo i nostri atomi con delle palline sferiche, riusciremo a rappresentare in modo soddisfacente la maggior parte delle nostre scoperte. Ciò significa che se un atomo è circondato da piú atomi della stessa specie, esso deve distare egualmente da ciascuno di essi; ed in generale questa rappresentazione corrisponde alla realtà. Naturalmente vi sono delle eccezioni, come per esempio con il cristallo di puro bismuto, nel quale ciascun atomo è circondato da sei compagni, di cui però tre sono ad esso piú vicini degli altri tre. Perciò, nel costruire il modello del cristallo di bismuto dovremo ricorrere a delle sferette legger-

mente appiattite in tre punti (fig. A in tavola I).

Vediamo adesso in quale modo gli atomi sono tenuti insieme nelle varie combinazioni e strutture. Quando costruiamo una casa, abbiamo a nostra disposizione mattoni, pietre, travi, ed altri elementi costruttivi; ora invece varie specie di atomi. Ma se volgiamo lo sguardo intorno in cerca di malta e chiodi, non ne troviamo. La natura non abbisogna di un materiale analogo al cemento. Gli atomi aderiscono tra di loro senza il concorso d'un agglomerante qualsiasi. Il chimico c'insegna che basta metterli in reciproca presenza ed osservare determinate regole, di cui talune alquanto singolari. Allora gli atomi si combinano tra loro e vi è qualcosa negli atomi medesimi che li tiene insieme finché rimangono rispettate le suddette condizioni. Tutta la chimica si basa sulla conoscenza di queste condizioni e dei loro effetti.

Gli atomi sembrano aderire tra loro come magneti, di cui si presentino l'un l'altro gli opposti poli, oppure come corpi carichi d'elettricità di segno contrario. In verità non c'è dubbio che con gli atomi entrino in gioco tanto l'attrazione magnetica che elettrica. Il modo col quale quest'attrazione agisce non ci è del tutto ignoto, ma sappiamo molto di piú intorno alle regole secondo le quali gli atomi si combinano tra loro — cioè intorno ai fenomeni chimici — che non intorno ai particolari delle at-

trazioni. Non è il caso di preoccuparcene: per ora ci basta sapere che esistono delle forze che tengono uniti gli atomi.

Possiamo domandarci: se queste forze attrattive esistono, perché tutti gli atomi di questo mondo non si riuniscono insieme a formare un unico e colossale blocco di materia? Perché esistono dei gas e dei liquidi? Come mai si spiega che ci sono persino degli atomi che non si combinano affatto con i loro simili? Che cosa impedisce alla Terra di cadere sul Sole e la solidificazione finale dell'intero Universo?

La Terra non cade sul Sole per via del suo moto di rotazione intorno a questo o, per dirla piú esattamente, perché i due corpi celesti si muovono l'uno intorno all'altro. È il loro reciproco moto che li tiene lontani e, se consideriamo piú addentro le cose, troviamo che il moto è di estrema importanza per tutto l'Universo, poiché si oppone alle forze attrattive che tenderebbero a riunire tutti gli atomi del mondo in un unico blocco. Nei gas, il moto ha la parte preponderante. In essi gli atomi si muovono tanto rapidamente da non avere tempo di entrare in una qualsiasi reciproca combinazione. Di tanto in tanto, occasionalmente, un atomo ne incontra un altro e per cosí dire gli tende la mano, ma invano, poiché la loro reciproca velocità è cosí grande, che sono tosto di nuovo assai lontani l'uno dall'altro. Persino in un liquido, nel quale gli atomi sono continua-

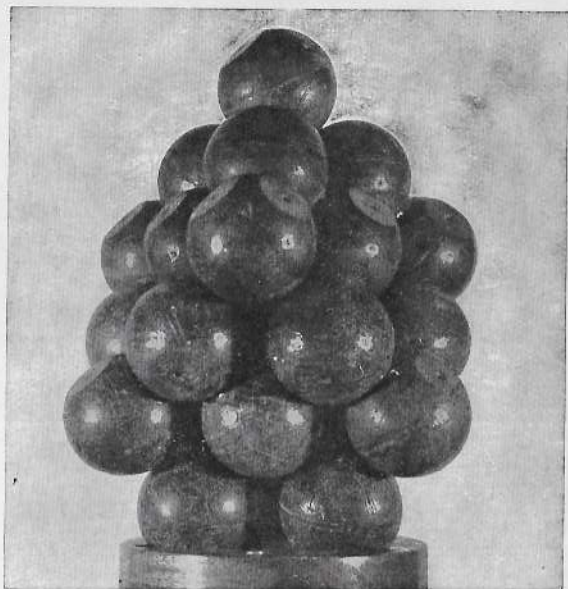



FIG. A. Modello del cristallo di bismuto.
Il modello mostra la disposizione degli atomi nel cristallo del bismuto. Ciascun atomo è rappresentato da una pallina appiattita in tre punti.

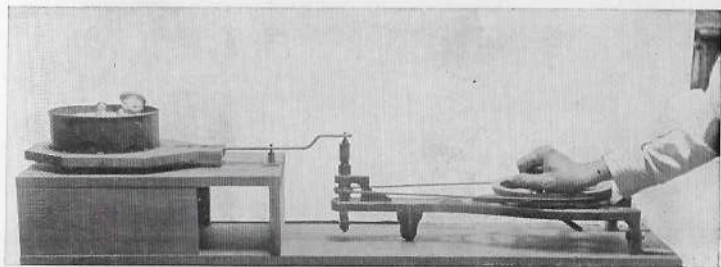
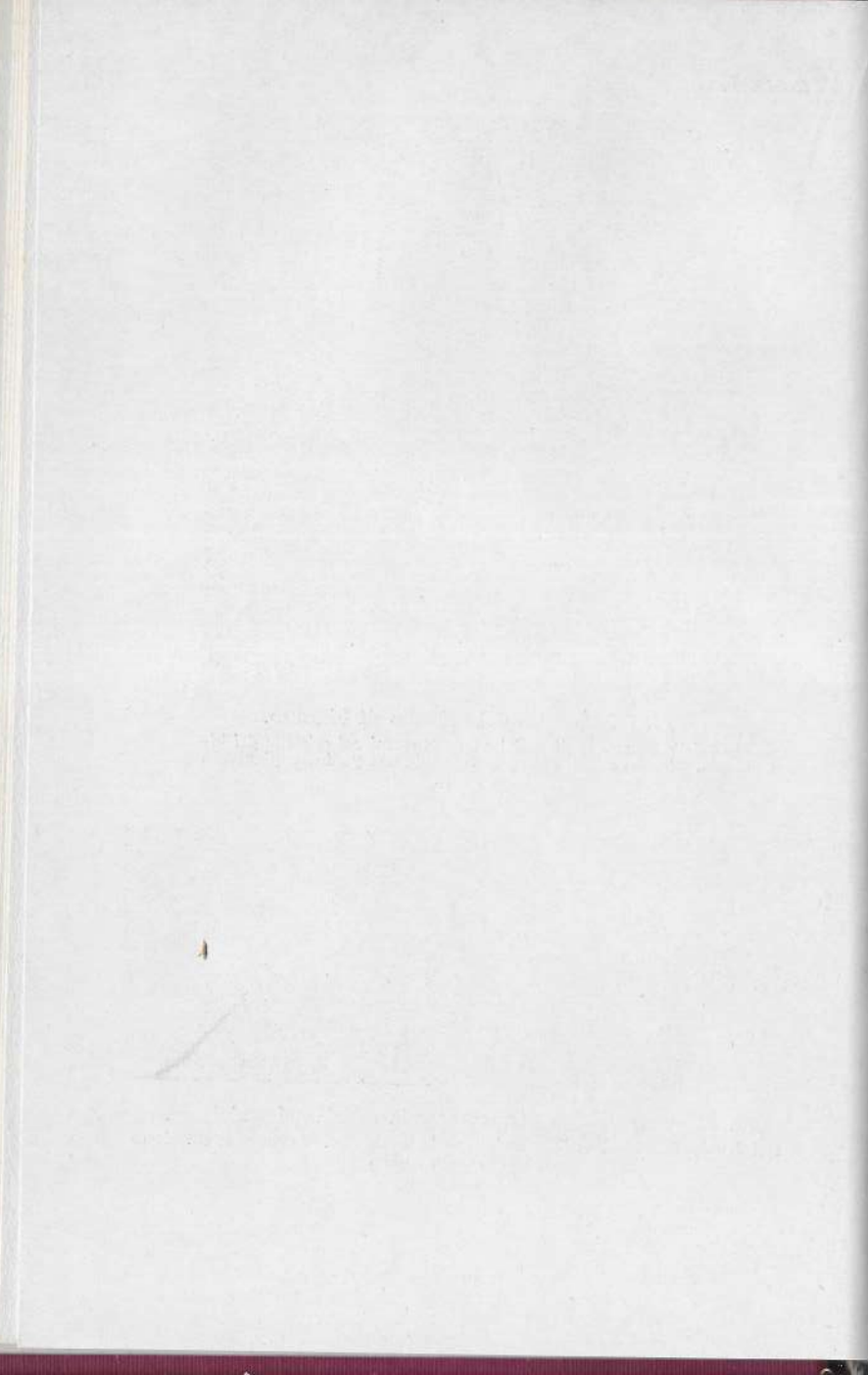



FIG. B. Il dispositivo per scuotere la sabbia nel recipiente.
Il recipiente cilindrico è visibile a sinistra; la bamboletta di celluloide sta giusto emergendo dalla sabbia.

mente in contatto fra di loro, il moto è cosí intenso che nessuna loro unione riesce permanente.

Nei corpi solidi, invece, l'importanza relativa delle forze d'attrazione e del movimento è invertita: le prime hanno ora il sopravvento e mantengono stabilmente atomi e molecole nella loro reciproca posizione. Ma neppure nei solidi gli atomi sono perfettamente immobili; per lo meno essi vibrano oscillando intorno alla loro posizione media, proprio come le membrature di un ponte metallico vibrano quando passa sopra di esso un treno. È difficile immaginarsi che gli atomi e le molecole di sostanze che, come l'acqua in un bicchiere, un pezzo di carta, un tavolo, appaiono perfettamente in quiete, sieno tutte in perpetuo movimento. Ma già antiche menti avevano afferrato la cosa e visto giusto. Cosí per esempio Hooke, un fisico inglese del diciassettesimo secolo, spiegò, ricorrendo ad una acuta analogia, la differenza che supponeva esistesse fra lo stato solido e quello liquido, attribuendola al moto degli atomi, piú accentuato nei liquidi che nei solidi. « Anzitutto » egli diceva « qual è la causa della fluidità? Questa non può essere dovuta ad altro che ad una assai vivace ed impetuosa agitazione delle particelle materiali (come già in altro luogo abbiamo accennato essere probabile); di conseguenza i legami fra le particelle del corpo si allentano di tanto ch'esse possono muoversi facilmente in ogni direzione, dando luogo

ad un fluido. Cerchiamo di spiegarci questo fenomeno con una grossolana analogia: supponiamo che una scodella piena di sabbia venga posta sopra un oggetto dotato di rapida e violenta agitazione di tipo vibratorio, come la pietra superiore di una macina che giri a vuoto, oppure una pelle di tamburo ben stesa che venga battuta vigorosamente o molto rapidamente con le bacchette. Con questo sistema la sabbia, che dapprima giaceva inerte ed inattiva nella scodella, diviene del tutto fluida e, se anche vi provate a fare in essa un buco col dito, tosto la cavità si riempie di nuovo e la superficie della sabbia ridiventa piana. E nemmeno riuscireste a seppellire sotto la sabbia un oggetto leggero, per esempio un turacciolo di sughero, poiché, appena abbandonato a se stesso, questo emerge o galleggia come prima alla superfice. Parimenti non sareste capaci di far stare sulla sabbia un corpo piú pesante di essa, per esempio un pezzo di piombo, poiché immediatamente va a fondo. Se poi praticate un foro nel fianco della scodella, la sabbia ne uscirà finché il suo livello sarà quello del foro. Non vi è proprietà dei fluidi che non si possa in tal modo imitare; e tutto ciò è unicamente dovuto alla vigorosa agitazione del recipiente; poiché con questo mezzo si partecipa a tutta la sabbia un rapido moto vibratorio, tale che nessun altro corpo piú pesante di essa può rimanere alla sua superfice, se non sostenuto in

qualsiasi altro modo; e nemmeno la sabbia tollera un oggetto sprofondato nella sua massa, se non è di essa piú pesante. »

L'esperimento di Hooke si può ripetere in una forma un poco differente. Un recipiente metallico largo 30 centimetri e profondo 10 cm è fissato su una piattaforma appoggiata su sfere metalliche, in modo che possa muoversi facilmente. La piattaforma è connessa mediante un eccentrico (come in fig. B della tavola I) con una puleggia munita di impugnatura. Facendo girare rapidamente questa puleggia, il recipiente e la sabbia in esso contenuta vengono agitati vigorosamente come prescritto da Hooke. I particolari del meccanismo si comprendono meglio considerando la figura B della tavola I. Se si depone sulla sabbia una pesante sfera metallica, questa scompare all'istante mentre degli oggetti leggeri, per esempio palle da *ping-pong* affondate nella sabbia, vengono subito a galla. Comico è l'effetto che si ottiene seppellendo nella sabbia alcune di quelle bambolette di celluloide appesantite alla base, per cui non possono rovesciarsi. Le bambolette emergono man mano fuori della sabbia e finalmente si rizzano in piedi. (Tavola I B e fig. 1, A.)

Oggi sappiamo che l'agitazione degli atomi di un corpo si identifica col calore di quest'ultimo: quanto piú rapidamente essi si muovono o vibrano tanto piú caldo diventa il corpo. Ogni volta che

scaldiamo le nostre mani al fuoco, permettiamo all'energia irradiata dal fuoco di accelerare il moto degli atomi di cui le mani sono costituite. Raffreddando invece una sostanza, non facciamo altro che frenare il movimento vibratorio dei suoi atomi. Se potessimo arrestare del tutto il loro moto, la temperatura del corpo si abbasserebbe fino ad un punto oltre al quale non è possibile andare, cioè fino a quello che viene comunemente chiamato lo zero asso-

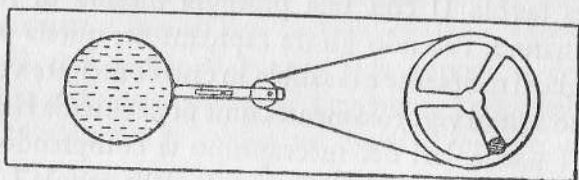



FIG. 1, A.

luto e che si trova a circa 273 gradi centigradi sotto lo zero della scala centigrada.

Come già dicemmo in precedenza, abbiamo trovato nella radioattività e nei raggi X dei nuovi alleati che ci aiutano nei nostri tentativi di giungere fino ai piccolissimi atomi. Essi hanno infatti aumentato parecchie decine di migliaia di volte la nostra acutezza di percezione. Il microscopio ha fatto del suo meglio, ma anche il piú piccolo oggetto che ci ha reso visibile era composto di bilioni d'atomi. Le lenti del microscopio non si potevano perfezionare oltre; la tecnica è giunta all'estremo delle sue possi-

bilità. La difficoltà risiede nel fatto che la luce è un moto ondulatorio e che le onde luminose non ci rendono percepibili i particolari di un oggetto se le dimensioni di questo non sono alquanto piú grandi della lunghezza delle onde. Ci occorreva un nuovo tipo di luce di lunghezza d'onda estremamente piccola; l'ottenemmo sotto forma di raggi X. In pari tempo la radioattività ci mostrò che cosa è in grado di fare un atomo quando gli si comunica una grandissima velocità. Oggi possiamo dunque « vedere » i singoli atomi, se non direttamente, almeno con profitto ed anche osservare qualchecosa di ciò che fanno: i raggi X ci aiutano nel primo caso, la radioattività nel secondo. Sono due alleati preziosi per accrescere la nostra conoscenza, come ora vedremo incominciando dalla radioattività.

Possiamo rappresentarci grossolanamente un atomo di radio come una sferetta relativamente grande; infatti l'atomo di radio è uno dei piú pesanti e grossi fra gli atomi: riunendone parecchi la sostanza costituita da un certo numero di tali atomi è un metallo come il ferro oppure l'oro. Di per se stesso l'atomo di radio non presenta nulla di speciale, ma, per certe ragioni che nessuno conosce, arriva un momento nel quale esso scoppia. Una piccola porzione dell'atomo viene lanciata lontano come un proiettile da un fucile, mentre l'altra parte, la piú grossa, rincula come il fucile medesimo. Questo

residuo non è piú radio, bensí un atomo piú piccolo, con proprietà del tutto differenti. Il radio si è trasformato in una sostanza completamente nuova. In realtà questa nuova sostanza è un gas, mentre il proiettile espulso dall'atomo di radio è stato dimostrato essere un altro atomo, il cui peso è uno dei piú piccoli fra i pesi atomici e precisamente il secondo, dopo quello dell'idrogeno, che è il piú basso che si conosca. Questo atomo cosí leggero si chiama elio. Nessuno sa da che cosa dipende l'esplosione dell'atomo di radio e parimenti nessuno conosce un mezzo qualsiasi per favorirla od impedirla. La probabilità che un atomo di radio esploda ad un dato istante è la stessa tanto se si trova in un forno quanto in aria liquida. La sua indipendenza dalle condizioni ambienti riguardo all'istante della sua disgregazione si manifesta ancora piú chiaramente per il fatto che anche una combinazione con altri atomi di specie diversa non ha alcuna influenza sul fenomeno. Una combinazione, o formazione di molecole, riguarda evidentemente solo la zona esterna dell'atomo mentre la causa dell'esplosione si nasconde nel suo interno.

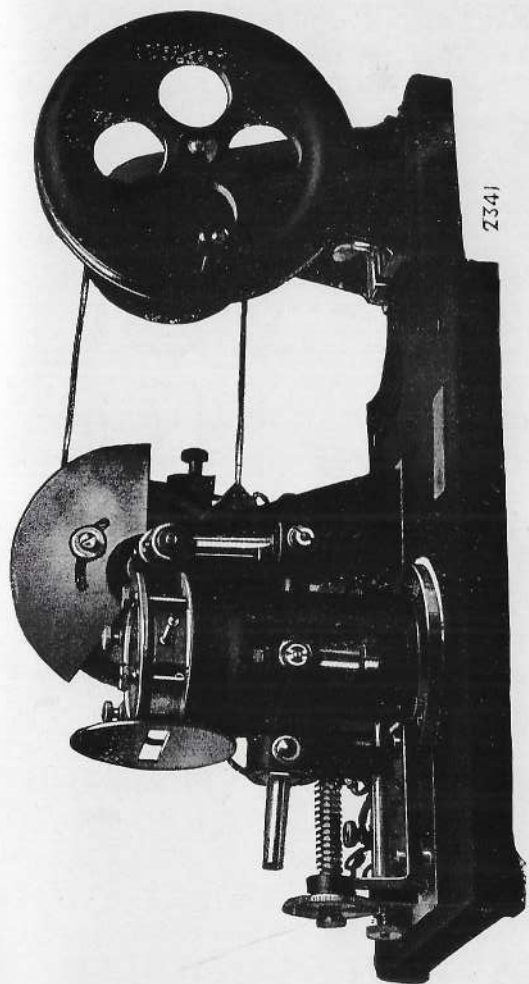
Gli antichi alchimisti cercavano con ogni mezzo di trasformare un atomo in un altro, preferibilmente del piombo in oro. Ebbene: nel radio avviene una trasmutazione, per usare un'antica parola, del genere di quella sognata dagli alchimisti. Ma

non è esattamente la stessa cui gli alchimisti tendevano, e ciò per due ragioni. In primo luogo, essa non può venire controllata dalla volontà umana, cosa fuori del comune, poiché esistono poche cose di cui si può dire altrettanto. Anche quando non comprendiamo affatto il meccanismo in un dato fenomeno, possiamo sovente decidere se farlo avvenire o no. Per esempio non sappiamo affatto perché germina un seme ed ancor meno siamo in grado di creare un seme che agisca in tal modo, ma possiamo conservare dei semi in una scatola ed impedire che germinino, finché ci aggrada. Invece l'atomo di radio non attende affatto il nostro permesso per esplodere.

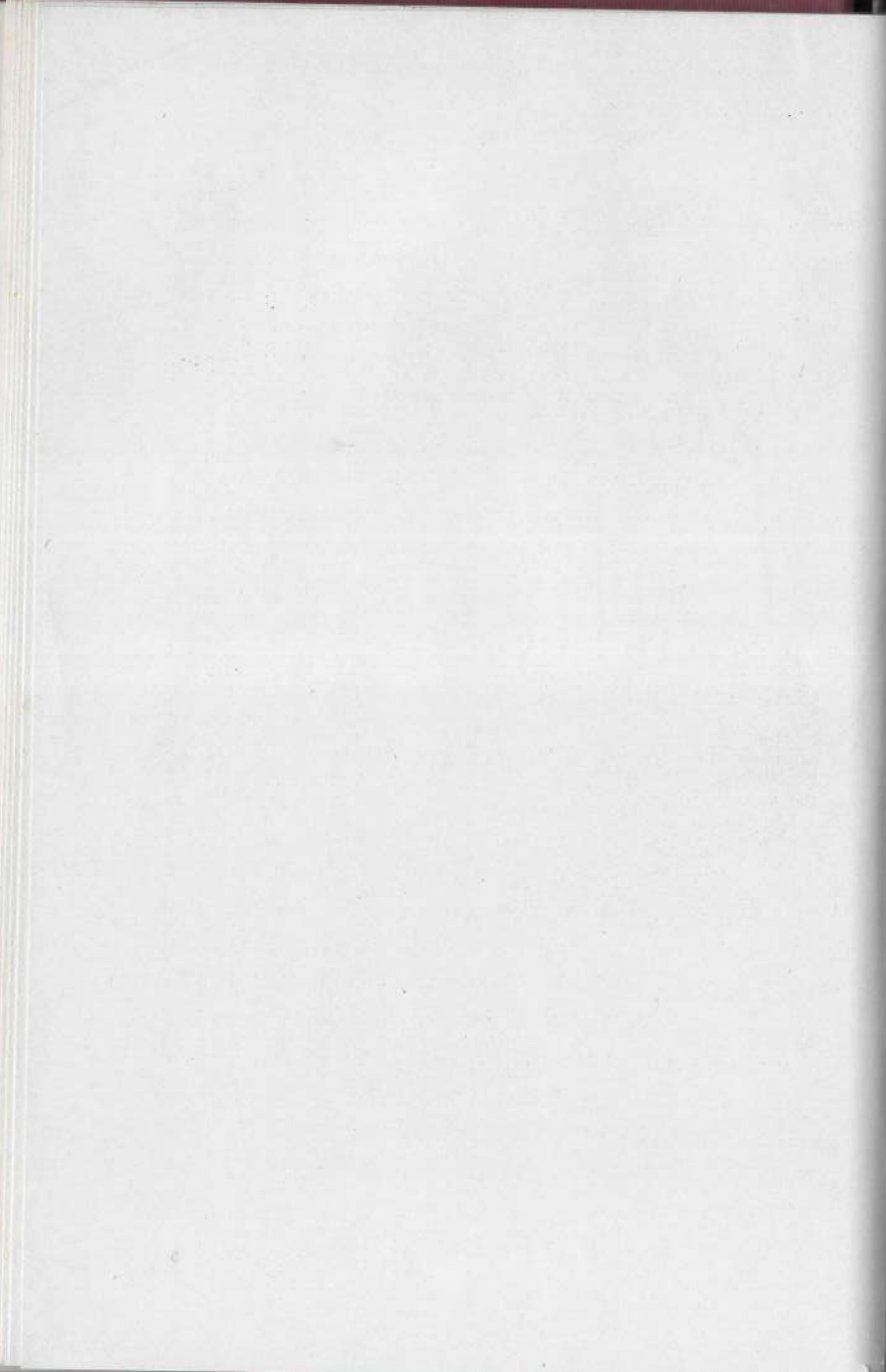
In secondo luogo la trasmutazione non termina con dell'oro; il risultato finale è infatti del piombo.

Il gas costituito dai residui degli atomi di radio, dopo che questi hanno espulso un atomo d'elio, ha una vita assai effimera: in media ogni atomo di questo gas vive un po' meno di sei giorni, mentre la vita media dell'atomo di radio è di oltre duemila anni. In seguito ad una seconda esplosione l'atomo di gas si trasmuta in una nuova sostanza detta « radio A » ed in questa circostanza viene di nuovo espulso un atomo d'elio. Cosí si susseguono altre esplosioni a diversi intervalli medii di tempo l'una dall'altra ed il risultato o prodotto finale è realmente del piombo, non dell'oro. Il gas suddetto venne

chiamato da Rutherford, che lo scoprí, « emanazione del radio ».

Tutti questi processi sono veramente meravigliosi; ma state un po' a sentire che cosa avviene del proiettile dopo aver abbandonato il fucile, cioè l'atomo di radio. La velocità con la quale esso parte è cosí grande, che non si sarebbe mai potuta ritenere possibile per una particella materiale. Quando Huyghens disputava con Newton intorno alla natura della luce, egli rigettava l'idea di Newton che la luce consistesse in una proiezione di corpuscoli da parte della sorgente luminosa, poiché riteneva impossibile che delle particelle materiali potessero viaggiare nello spazio con quella enorme velocità che proprio in quei tempi si era riscontrata per la luce. È singolare il fatto che ora c'imbattiamo in atomi che si muovono con una velocità di almeno un decimo od un ventesimo di quella della luce, quindi con una velocità dello stesso ordine di grandezza di quella che era allora sembrata impossibile. Ci sono persino certe particelle, dette « elettroni », pure espulse dalle sostanze radioattive, che in taluni casi viaggiano con una velocità molto prossima a quella stessa della luce. È singolare che anche un secondo argomento usato da Huyghens contro Newton ha perso ogni valore dopo che vennero osservati certi fenomeni della radioattività. Egli diceva che secondo la teoria di Newton sarebbe

(per concessione della « Cambridge Scientific Instrument Co. »)

Apparecchio di Shimizu-Wilson per l'osservazione dei raggi radioattivi.

L'apparecchio rende visibili i percorsi degli atomi d'elio espulsi dagli atomi di radio. In alto a sinistra si trova la camera, la cui sezione è data in fig. 2. Il disco a sinistra della camera è uno schermo con foro rettangolare, attraverso il quale passa la luce di una lampada (non riprodotta in figura) che illumina le tracce di nebbia degli atomi d'elio. Vi è poi un secondo schermo il quale girando permette ai raggi del radio, cioè agli atomi d'elio, di penetrare nella camera un istante prima di praticare l'espansione. A destra, il meccanismo di comando dell'apparecchio.

impossibile a due persone di guardarsi negli occhi, perché le particelle costituenti la luce s'urterebbero reciprocamente e cadrebbero a terra. Vedremo subito che anche questa obbiezione non regge davanti ai fatti della radioattività.

L'atomo d'elio espulso da quello di radio inizia il suo volo con una velocità di circa 15 000 chilometri al secondo. In meno di un minuto potrebbe fare il viaggio d'andata e ritorno per la Luna, purché conservasse costantemente la sua velocità iniziale. Ma il curioso è che ad onta di tutta la furia e la energia con la quale l'atomo d'elio parte, non riesce ad andare molto lontano quando deve attraversare della materia. Persino nell'attraversare soltanto dell'aria la sua velocità si riduce a dei valori ordinari dopo aver percorso da tre a quattro centimetri. In generale esso procede perfettamente in linea retta, come un'esperienza ci mostrerà tosto; e questo è un punto importantissimo che dobbiamo tenere particolarmente presente. Di primo acchito non si capisce perché debba essere cosí strano che il percorso della particella sia perfettamente rettilineo: si pensa per esempio ad una palla sparata attraverso un blocco di legno e che vi produce un foro cilindrico; oppure all'inizio quasi rettilineo della traiettoria d'un proiettile da cannone. Ma il paragone non regge. La palla è un blocco metallico enormemente piú pesante di una qualsiasi molecola ch'essa

incontra nel suo viaggio attraverso il legno o l'aria, per cui sposta semplicemente l'ostacolo. Invece l'atomo di elio è piú leggero e piú piccolo degli atomi d'azoto e d'ossigeno di cui è prevalentemente costituita l'aria, per cui dobbiamo ricorrere ad un paragone che meglio risponda alla realtà.

Supponiamo che un certo numero di palle d'avorio sia sparso su un bigliardo, a rappresentare altrettante molecole d'aria. Veramente, affinché il paragone calzi, bisognerebbe che le palle fossero in continuo moto; ma ciò non è di grande importanza. Spingiamo ora una palla verso un punto della sponda opposta del bigliardo ed osserviamo che cosa succede quando tenta di aprirsi un varco attraverso la moltitudine di palle che giacciono sul bigliardo, non importa se ferme o in movimento. La nostra palla urta contro una delle sue compagne e viene deviata a lato, indi collide con un'altra e cosí via, perdendo ben presto ogni traccia della sua direzione iniziale. Proviamo un'altra volta spingendo la palla con tutta la nostra forza; inutile: la direzione primitiva non viene mantenuta. Per quanto grande sia la velocità impressa alla nostra palla, è impossibile farle percorrere un tragitto rettilineo.

Questo quadro o modello è assai piú rispondente alla realtà che non quello del proiettile sparato dal fucile e mette in chiaro la singolarità del fenomeno radioattivo. Un atomo d'elio deve incontrare un

gran numero di molecole d'aria se procede in linea retta e se gli atomi sono della grandezza che abbiamo indicato in precedenza. Invero le molecole d'aria che si addensano lungo il percorso dell'atomo d'elio sono enormemente piú numerose delle palle da bigliardo nel nostro modello. Si può calcolare quante molecole d'aria, le une d'azoto le altre d'ossigeno, verrebbero trafitte da un segmento rettilineo lungo da tre a quattro centimetri, tracciato improvvisamente in un istante qualsiasi nell'aria; il loro numero ammonterebbe a centinaia di migliaia. Come può ora l'atomo d'elio aprirsi rettilinearmente il passo in questa folla di molecole, ognuna delle quali è piú pesante di esso? E poiché è ovvio che ci riesce, cerchiamo di spiegarci questo fenomeno.

Si potrebbe forse pensare che la traiettoria dell'atomo d'elio sia rettilinea solo in apparenza e che, se si potesse distinguer meglio, si vedrebbe ch'essa è composta da innumerevoli zig-zag percorsi dall'atomo d'elio nei suoi urti contro le molecole d'aria. Ma basta un istante di riflessione per mostrare che l'idea è assurda: bisognerebbe infatti che l'atomo possedesse l'intelligenza di un essere vivente per accorgersi d'aver deviato e quindi riprendere la giusta direzione una volta lasciata. Se sull'opposto lato di una strada molto affollata esistesse una confetteria e dessimo ad un ragazzo una lira per acqui-

stare dei dolciumi, egli seguirebbe senza dubbio un cammino sostanzialmente rettilineo, benché costretto a scansare i veicoli ed a girare intorno alle persone. Ma non possiamo immaginarci un atomo d'elio che possa comportarsi in tal modo.

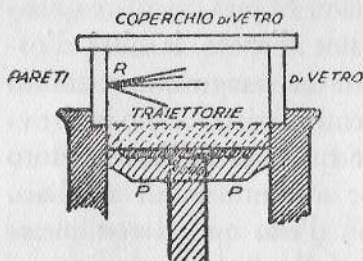



FIG. 2. Sezione della camera d'espansione dell'apparecchio usato da C. T. R. Wilson per misurare il percorso degli atomi d'elio (Vedasi anche la tavola II).

Lo stantuffo *PP* viene improvvisamente abbassato dall'altezza indicata con una linea tratteggiata a quella indicata con una linea piena; l'aria contenuta nella camera viene subitaneamente raffreddata dall'espansione, e della nebbia si forma lungo il percorso degli atomi d'elio, proiettati nella camera dal radio *R* situato a sinistra.

Non vi è che una sola via per spiegare la singolarità del percorso rettilineo: ammettere cioè che l'atomo d'elio passi attraverso le molecole che incontra e che vi riesce in un modo o nell'altro per via della sua straordinaria velocità. L'ipotesi è veramente sconcertante, ma non se ne presentano altre; ed in verità essa si dimostra capace di spiegare ancora molte altre cose. Di conseguenza ci sentiamo abbastanza sicuri di trovarci sulla giusta strada.

Ora è tempo d'osservare questo fenomeno con i nostri propri occhi: la conclusione alla quale siamo arrivati è cosí nuova e di tale importanza da desiderare di convincerci con un'esperienza che il percorso. dell'atomo d'elio è veramente rettilineo

Dobbiamo a C. T. R. Wilson un geniale apparecchio capace di mostrarci chiaramente che cosa succede e di cui faremo subito uso. Questa esperienza è una delle piú meravigliose del mondo scientifico. Essa ci mostra il reale percorso dei singoli atomi d'elio, ciascuno dei quali inizia il suo viaggio con una velocità di circa 15 000 chilometri al secondo, epperò lo termina già dopo un tragitto di circa 4 centimetri nell'aria.

Ma dobbiamo dapprima descrivere il geniale apparecchio e mostrare come lavora. Nella figura 2 si vede un recipiente cilindrico in ottone con un coperchio di vetro ed un fondo che si può abbassare od alzare variando cosí l'altezza interna della camera. Un meccanismo costituito da ingranaggi, leve e manovelle s'incarica di abbassare improvvisamente il fondo a determinati intervalli. Ogni volta che ciò succede, l'aria o gli altri gas contenuti nella camera vengono raffreddati in causa della loro subitanea espansione. Nel prossimo capitolo illustreremo piú diffusamente questo fenomeno.

Sulla parete interna della camera è fissato in modo conveniente un minutissimo granulo di radio. Ad ogni istante alcuni dei suoi atomi si disgregano, cioè esplodono espellendo ciascuno un atomo di elio, di cui un certo numero viene proiettato rettilinearmente nell'interno della camera. Il diametro di questa è tanto grande da permettere a tutti gli atomi

d'elio di finire la loro corsa nell'aria. La vita media del radio è cosí lunga che, anche se l'apparecchio resistesse per duemila anni, il granulo di radio non sarebbe ancora ridotto alla metà. Ad ogni secondo dieci, venti od anche cento atomi di radio scoppiano e si trasformano espellendo un atomo di elio per ciascuno. Non vi è forse modo migliore per dimostrare quanti atomi sono concentrati in quel piccolissimo spazio occupato dal granulo di radio.

L'aria nella camera viene tenuta umida, di conseguenza il raffreddamento dovuto all'espansione tende a produrre della nebbia. La nebbia, quando deve prodursi, tende a formarsi intorno a nuclei solidi di qualsiasi genere, piuttosto che dar luogo a goccioline liberamente sospese nell'aria. Se nell'aria esiste del pulviscolo, i granuli di questo agiscono come nuclei di condensazione del vapore acqueo; ecco perché la nebbia si forma tanto facilmente in una atmosfera impura. Ora, l'umidità dell'aria preferisce soprattutto depositarsi su quelle molecole attraverso le quali passò l'atomo di elio. Le molecole sono formate da atomi gassosi che vengono temporaneamente danneggiati da questo attraversamento: una piccola porzione di essi viene generalmente strappata via, porzione che oggi chiamiamo un « elettrone »; questo è carico di elettricità negativa e l'atomo gassoso che l'ha perduto risulta corrispondentemente carico d'elettricità po-

sitiva. L'elettrone liberato tosto o tardi aderisce a qualche atomo vicino; di conseguenza abbiamo ogni volta due atomi elettrizzati, l'uno positivamente e l'altro negativamente, mentre prima non ve ne erano affatto. L'atomo elettrizzato attira fortemente l'umidità, sicché la nebbia si forma piú volentieri intorno ad esso che su qualsiasi altro oggetto.

Appena quindi un atomo d'elio ha compiuto il suo percorso rettilineo attraverso il gas, lasciando dietro di sé un certo numero di atomi elettrizzati, e se in questo istante una subitanea espansione del gas provoca un raffreddamento, della nebbia si forma lungo la traiettoria dell'atomo d'elio. Illuminando ora l'interno della camera, le traiettorie dei varî atomi diventano visibili come raggi chiari spiccanti sul fondo oscuro della camera stessa. La loro durata è di pochi secondi, dopodiché le particelle di nebbia si disperdono lentamente. Se l'atomo d'elio termina la sua corsa proprio nell'istante in cui si espande il gas e si forma la nebbia, la sua traccia rettilinea è netta e distinta, perché gli atomi di gas elettrizzati non hanno avuto il tempo di allontanarsi dalla traiettoria dell'atomo d'elio. Ma se questa traiettoria è stata percorsa dall'atomo d'elio un certo tempo prima che avvenisse l'espansione, la linea di nebbia è molto piú diffusa e svanita. Non dobbiamo dimenticare che gli atomi d'elio vengono espulsi dal radio ininterrottamente notte e gior-

no, ma che le loro traiettorie diventano visibili solo quando l'aria umida circostante viene raffreddata mediante espansione (Tavola III).

Se osserviamo le successive espansioni vediamo che le tracce degli atomi d'elio, benché in gran parte rigorosamente rettilinee, subiscono talora una netta deviazione, specialmente quando s'avvicinano alla loro fine. Questo fatto si è dimostrato assai importante, come ora vedremo.

Per spiegare i fenomeni ora esposti sarà necessario di modificare la prima concezione che ci siamo fatta dell'atomo. Gli atomi devono essere costituiti in modo che quando ordinariamente s'incontrano, per esempio quando collidono tra loro delle molecole (che sono formate da atomi) d'ossigeno nell'aria, essi si comportino come se ciascuno occupasse uno spazio nel quale nessun altro atomo può entrare; oppure quando sono addensati come in un solido, occupino complessivamente tanto spazio da trovar posto per tutti. Ma quando un atomo — per esempio d'elio — viene proiettato con sufficiente velocità contro un altro, riesce ad attraversarlo come se il cerchio difensivo intorno agli atomi si fosse rotto. Possiamo spiegarci questo fatto immaginando che ogni atomo, al pari di un sistema solare in miniatura, consti di un nucleo centrale (il Sole) intorno al quale vi sieno tanti elettroni che facciano da satelliti o pianeti.

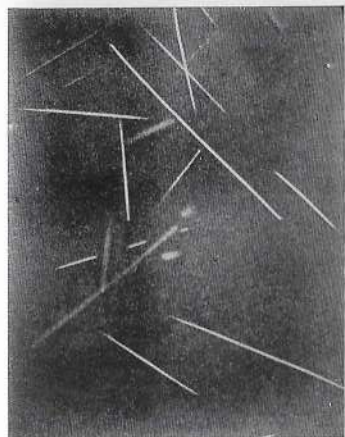
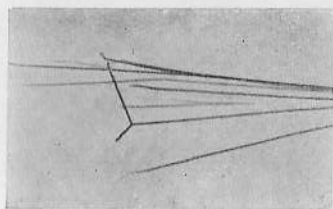
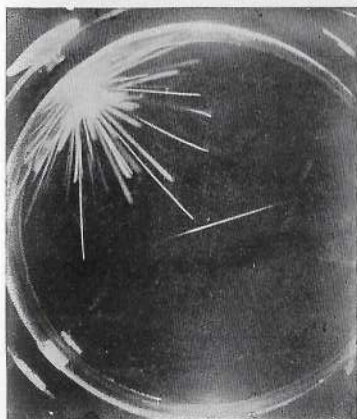
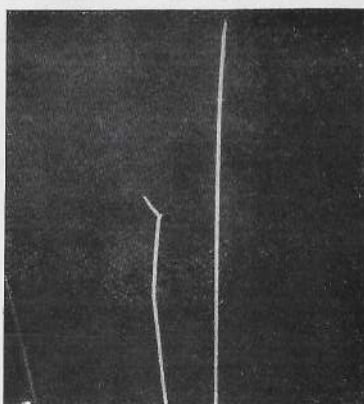
TAVOLA III.

Le tracce delle particelle «alfa».

Tavola IV.

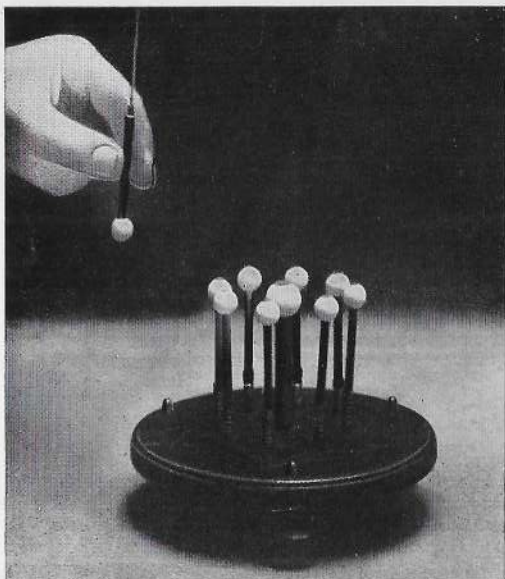



Fig. A. Barre magnetizzate sostenute da molle spirali.

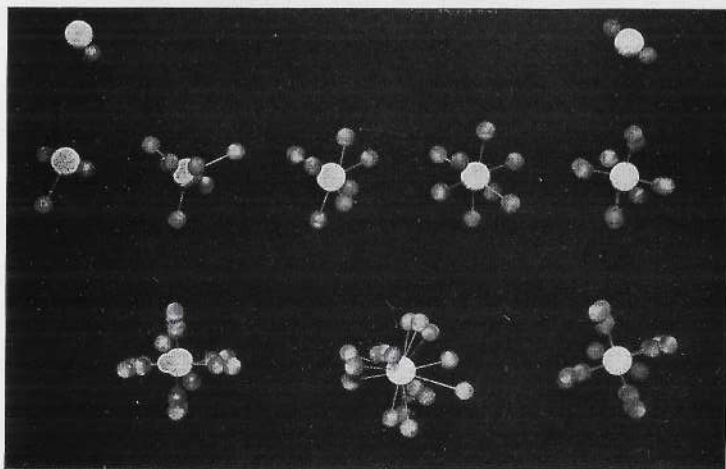



Fig. B. Modelli atomici: il nucleo è rappresentato da una pallina bianca, gli elettroni da palline scure.

Il nucleo centrale è carico d'elettricità positiva; ogni elettrone satellite è invece carico d'elettricità negativa e tutti questi elettroni sono eguali tra di loro. La carica positiva del nucleo centrale ha un valore tale da compensare esattamente quella rappresentata dalla somma delle cariche negative degli elettroni satelliti. Possiamo immaginarci che gli elettroni ruotino intorno al nucleo centrale, proprio come i pianeti intorno al sole; non c'è dubbio però che il loro moto è assai piú complicato, ma per il momento possiamo fare a meno di tenerne conto.

Mentre finora ci siamo rappresentati un atomo come una specie di solida e rotonda pallina di una certa grandezza, abbiamo ora dinanzi a noi qualche cosa che somiglia ad un sistema solare in miniatura. Comprendiamo quindi senz'altro come un atomo di questa fattura possa attraversare altri atomi consimili, proprio come possiamo immaginare che un intero sistema solare ne attraversi un altro senza danno reciproco, purché nessun corpo dell'un sistema urti direttamente contro un corpo dell'altro e che la velocità d'attraversamento sia grande abbastanza. Quest'ultima condizione è essenziale poiché, se un sistema si soffermasse troppo a lungo nell'interno o all'intorno di un altro, ne conseguirebbero delle perturbazioni molto serie delle orbite planetarie.

Se le cose stanno cosí, possiamo ora domandarci:

come fa un atomo per impedire ad altri atomi di entrare nel proprio dominio? Come si difende dall'intrusione, conservando per sé una data porzione di spazio, quando la velocità con la quale un altro atomo gli arriva addosso è piccola? Ciò si spiega se consideriamo la particolare disposizione delle cariche d'elettricità positiva e negativa nell'atomo. Abbiamo visto che il nucleo d'un atomo è circondato da elettroni, che formano intorno al nucleo una specie di guscio, di manto; quando due atomi collidono tra loro, vengono dapprima a toccarsi questi gusci. E siccome cariche elettriche della stessa specie o nome si respingono reciprocamente, si manifesterà fra i due atomi una forza tendente a separarli di nuovo; in altre parole: ognuno di essi si oppone ad una usurpazione del proprio dominio. Certamente la nostra è una raffigurazione assai rozza di quanto realmente succede ed è invero difficile spiegare in questo semplice modo l'intensità, il vigore delle forze repellenti. Tuttavia questa ipotesi riposa senza dubbio su un principio giusto. Quando i due atomi s'avvicinano reciprocamente a grandissima velocità, il sistema d'elettroni e nucleo dell'uno sguscia attraverso il sistema dell'altro. Illustreremo la cosa con un modello.

La tavola IV mostra un gruppo di sbarre magnetizzate tenute ritte da altrettante molle spirali. L'estremità superiore del magnete centrale è un polo po-

sitivo (Nord), quelle dei magneti che lo attorniano sono tutti poli negativi (Sud). Il modello rappresenta il nucleo atomico con i suoi elettroni satelliti; questi ed il nucleo sono qui disposti in un sol piano; nell'atomo non è cosí, ma la differenza non ha per

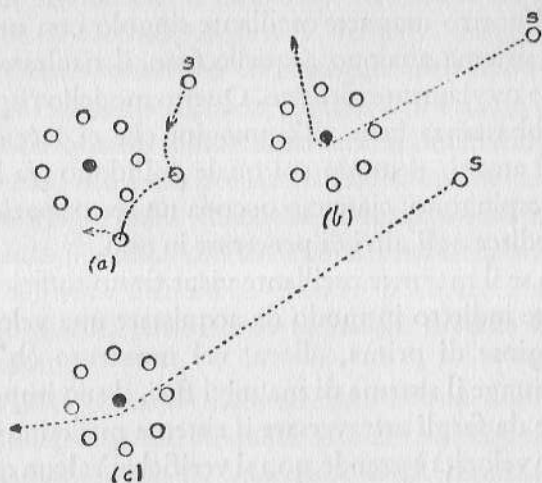



FIG. 3. (*a*), (*b*) e (*c*).

noi alcuna importanza. Verticalmente sopra il magnete centrale è sospeso mediante un lungo filo un altro magnete col polo Sud verso il basso; la lunghezza del filo di sospensione è tale che il magnete oscillante passa giusto sopra quelli fissi senza toccarli. Se ora tiriamo da una parte (*S* in fig. 3, *a*) il magnete sospeso e, senza allontanarlo troppo, lo

lasciamo a sé, esso si muove verso i magneti fissi, ma è incapace di penetrare nel loro cerchio. Sembra ch'esso bussi or qua or là ad una porta e subito indietreggi. Proprio cosí un elettrone batterebbe invano contro le difese esterne di un atomo qualora non procedesse con sufficiente energia. Rimpiazzando il nostro magnete oscillante singolo con un intero sistema analogo a quello fisso, il risultato sarebbe ovviamente identico. Questo modello risponde abbastanza bene all'immagine che ci facciamo degli atomi, al modo col quale collidono tra loro e si respingono; ciascuno occupa un certo spazio ed impedisce agli altri di penetrare in esso.

Ma se il magnete oscillante viene tirato sufficientemente indietro in modo da acquistare una velocità maggiore di prima, allora, nel momento ch'esso raggiunge il sistema di magneti fissi, il suo impulso è tale da fargli attraversare il sistema medesimo. Se la sua velocità è grande, non si verificherà alcun cambiamento notevole nella sua direzione di marcia (fig. 3, *c*); ma se è piccola, esso viene piú o meno deviato dalla sua direzione primitiva (fig. 3, *b*); inoltre ha perso energia, poiché la sua uscita dal sistema avviene a velocità piú piccola; questa energia la ritroviamo comunicata ai magneti fissi, che infatti oscillano leggermente. Il fenomeno è lo stesso qual si sia il polo magnetico del magnete oscillante rivolto in basso, e comunque si sostituisca questo

magnete con un sistema completo formato da nucleo e satelliti.

Il comportamento del modello ci permette di prevedere che cosa succede nell'incontro di due atomi del genere che ora ci rappresentiamo. Quando si avvicinano a moderata velocità si respingeranno a vicenda, mentre a velocità maggiori si compenetreranno ed il passaggio dell'uno attraverso l'altro avverrà con risultati tanto meno appariscenti quanto piú grande era la loro reciproca velocità. Ma è sempre da attendersi una deviazione percettibile dalla direzione originaria del moto quando il nucleo dell'un atomo passa troppo vicino a quello dell'altro. Quanto piú però i nuclei sono piccoli tanto meno probabile diventa la deviazione.

Avrete già indovinato che queste deviazioni sono dello stesso genere di quelle visibili nelle figure A-C della tavola III. Le traiettorie degli atomi d'elio sono di massima perfettamente diritte; tuttavia si possono in esse riscontrare delle decise deviazioni, di solito non piú di una o due per traiettoria e quasi sempre verso la loro fine. Ciò era da attendersi, poiché allora la velocità del moto ha già diminuito. Un esempio molto perspicuo di queste deviazioni è visibile nella fig. C della tavola III ove è stato riprodotto in scala piú grande. Il raggio superiore mostra una leggera ma netta deviazione alla sua

estremità ad una certa distanza dalla fine ed una altra piú pronunciata proprio dove termina. Cosí la nuova concezione della struttura atomica spiega tutti i fenomeni osservati, in modo soddisfacente.

È strano pensare che un atomo, analogamente ad un sistema solare, possa essere per la maggior parte vuoto e non un corpo sferico rotondo, solido, compatto, assolutamente impenetrabile; nuclei ed elettroni sono come i soldati di un'armata che occupano un paese; i loro corpi non sono a stretto contatto tra di loro, eppure impediscono l'accesso ai soldati nemici da un confine all'altro.

Quanto precede è il frutto di lunghe osservazioni e di molte prese fotografiche. Delle deviazioni dei raggi se ne verificano ad ogni espansione del gas nella camera, ma può accadere talvolta di dover attendere a lungo prima di ottenere una buona fotografia. Una ottima, dovuta a P. Blackett, è mostrata dalla fig. D della tavola III. Qui la camera era piena di gas elio invece che d'aria. Il nucleo dell'atomo d'elio proiettato dal radio, attraversando un atomo d'elio appartenente al gas della camera, ne ha colpito quasi in pieno il nucleo. Ambedue gli atomi si muovono dopo l'urto con quasi eguale velocità lasciando dietro di sé tracce di nebbia, come si vede nella figura. Se poi osserviamo attentamente la fig. C della tavola III vediamo in corrispondenza dell'ultima deviazione un piccolo risalto verso il

basso a guisa di sperone: in questo caso è un atomo di ossigeno o di azoto che ha deviato l'atomo d'elio ed ha rinculato in conseguenza. La sua traiettoria è molto corta perché esso è molto piú pesante dell'atomo d'elio che l'ha urtato, epperciò ha acquistato una velocità comparativamente piccola.

In alcune delle fotografie qui mostrate vi sono delle caratteristiche curiose che si possono però facilmente spiegare. Qualche traiettoria è infatti interrotta come se in tali punti non si fosse formata la nebbia. Ed è proprio cosí: manca la nebbia perché pochissimo tempo prima vi è passato un altro atomo d'elio e questo ha consumato tutta l'umidità circostante. Nella fig. B della tavola III si vedono molte tracce dovute all'emanazione del radio. Sembra ch'esse comincino in punti qualsiasi della camera; ciò si deve al fatto che gli atomi dell'emanazione hanno migrato all'interno della camera prima di scoppiare.

Passiamo ad un'altra questione: quanti elettroni satelliti possiede ciascun atomo? Le nuove scoperte ci presentano qui uno dei loro piú meravigliosi ed importanti risultati; non occorre spiegare come sia stato ottenuto: basta che lo descriviamo.

Nell'atomo, quale ora lo conosciamo, il nucleo è carico d'elettricità positiva ed il valore di questa carica è tale da neutralizzare esattamente la somma delle cariche negative degli elettroni che gravitano

intorno ad esso. Tutti gli elettroni, come abbiamo detto, sono eguali tra loro. Troviamo solo una differenza nel numero di elettroni satelliti che sono contenuti nei diversi atomi; i diversi tipi di atomi hanno cioè un diverso numero d'elettroni periferici ed è solo questo numero che determina il comportamento dell'atomo verso gli altri atomi. Per esempio l'atomo di carbonio conta sei elettroni satelliti; la carica positiva del suo nucleo compensa esattamente le sei cariche negative, eguali tra loro, di questi elettroni. Ogni atomo che contiene sei elettroni è un atomo di carbonio: per quest'atomo non occorre alcuna altra definizione. Analogamente l'atomo con sette elettroni è di azoto, quello con otto è d'ossigeno, ecc. Tutti i numeri furono trovati in Natura: dall'atomo con un elettrone (l'idrogeno) fino all'atomo con 92 elettroni (l'uranio).

Nella fig. B della tavola IV sono visibili dei rozzi modelli dei nostri atomi. Il nucleo è rappresentato da una pallina di gomma bianca; gli elettroni dalla testa degli spilli infilzati nella pallina centrale; gli spilli possono essere di varia lunghezza (pag. 87).

È veramente strano che l'immensa varietà delle cose naturali si possa ricondurre ad una serie di numeri. Una volta si riteneva che fra le diverse specie di atomi esistessero delle differenze piú profonde; ora ci si meraviglia che fra un atomo e l'altro la diversità consista in cosí poco. La caratteristica inva-

TAVOLA V.

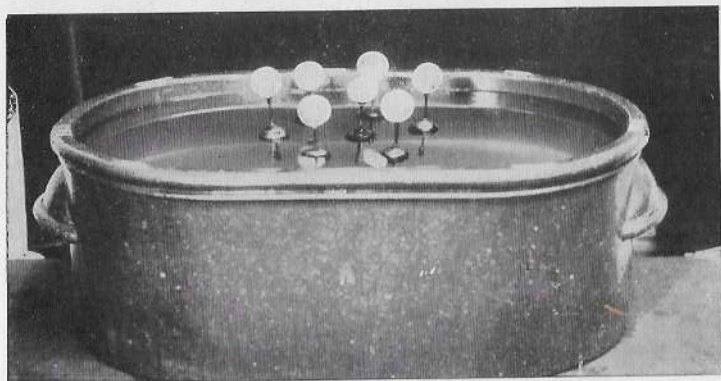



FIG. A. Magneti galleggianti.

Quando il numero dei magneti galleggianti è piccolo, formano un unico anello; quando è notevole, piú anelli concentrici.

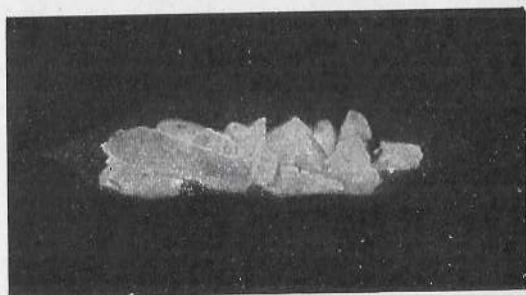



FIG. B. Cristalli posti in un tubetto riempito con l'emanazione del radio.

(Dal « SODDY: *Interpretation of the Radium Atom* »)

riabile di una qualsiasi specie di atomi sta solo nella grandezza (valore) della carica positiva del nucleo, la quale, dovendo il complesso dell'atomo essere neutro, determina cosí il numero degli elettroni che si raccolgono intorno al nucleo. Siamo indotti a supporre che gli elettroni si distribuiscano nell'atomo secondo qualche disposizione regolare; ed infatti vedremo piú avanti che è precisamente cosí. Ma definire questa disposizione caso per caso nonché quali sono le forze che la determinano, sono problemi assai difficili; per cui siamo costretti a passar sopra alla maggioranza di essi ed a limitarci a considerare soltanto uno o due aspetti della questione.

Anzitutto è interessante osservare come si dispongono i piccoli magneti verticali galleggianti nel recipiente di vetro della fig. A di tavola V. Essi sono sostenuti da palle da *ping-pong* tinte in nero e, per poterli vedere meglio, provvisti in alto di palle da *ping-pong* bianche. I magneti sono tutti disposti con lo stesso polo in alto, di modo che si respingono a vicenda addossandosi lungo il bordo del recipiente. Ma sotto quest'ultimo si trova un elettromagnete, il quale, quando viene eccitato, li attira e raduna insieme. Evidentemente, il modo col quale vengono allora a disporsi dipende in parte dall'attrazione verso il centro dovuta all'elettromagnete ed in parte dalla loro mutua repulsione. Qualche cosa di simile deve aver luogo nell'atomo, ma non dobbiamo

spingere troppo oltre la nostra analogia, poiché le forze che vi si esercitano possono essere del tutto differenti da quelle che si presentano nel nostro modello. Dobbiamo accontentarci di riscontrare che, quando i magneti galleggianti sono pochi, esse si raccolgono al centro secondo un cerchio e che se sono in numero maggiore si dispongono secondo tanti anelli concentrici. È di grazioso effetto, quando si introducono i magneti ad uno ad uno al bordo del recipiente, vederli migrare verso il centro ed assumere dignitosamente il proprio posto.

Una disposizione analoga a questa dei magneti è assunta dagli elettroni intorno al nucleo atomico; essi si ripartiscono in gusci o gruppi concentrici, sui quali ritorneremo nel prossimo capitolo. Il nostro esperimento non vuol dimostrare che nell'atomo succede realmente cosí, ma ci autorizza a supporre di non essere lontani dal vero.

Ora possiamo capire meglio che cosa avviene quando l'atomo d'elio proiettato dal radio lede gli atomi attraverso i quali passa, rendendoli atti ad attirare le particelle d'umidità che formano la nebbia. È infatti possibile che il danneggiamento degli atomi consista nello strappamento di uno dei loro elettroni satelliti. Lungo il suo tragitto, l'atomo d'elio lanciato dal radio priva un atomo dopo l'altro del gas di un elettrone periferico, e gli elettroni cosí liberati se ne vanno per loro conto. Ma la loro vita

indipendente è di corta durata: ognuno trova ben presto un altro atomo cui attaccarsi. L'atomo che ha perso un elettrone è ora caricato negativamente; quello che l'ha acquistato, positivamente. I due atomi ritornerebbero di nuovo allo stato di prima, scambiandosi l'elettrone, se potessero avvicinarsi abbastanza tra loro; e siccome movendosi nel gas ciò ogni tanto avviene, cosí l'intera massa del gas ritorna ben tosto elettricamente neutra.

Termineremo con una bellissima esperienza: quando gli atomi d'elio colpiscono certe sostanze, ne eccitano la fluorescenza. Considerata piú da vicino, questa fluorescenza consta in realtà di una serie di piccolissimi lampeggiamenti dovuti all'urto dei singoli atomi d'elio contro la superfice della sostanza. L'effetto, osservato al microscopio, è come se si gettassero tanti ciottoli in un lago fosforescente. Nel tubo di vetro della fig. B in tavola V sono racchiusi dei cristalli che brillano per eccitazione degli atomi d'elio che li colpiscono. I cristalli sono di kunzite, willemite e blenda. In un altro tubo è racchiusa una certa quantità di emanazione del radio, gas che, come vi ricorderete, è il diretto discendente del radio medesimo. Collegando i due tubi in modo che l'emanazione possa passare in quello dei cristalli, questi risplendono di vive luci colorate. I cristalli della fig. B sono stati fotografati alla luce stessa da essi emanata.

I fenomeni radioattivi ci hanno permesso di gettare, come vedemmo, uno sguardo nel profondo della struttura atomica. Il chimico è già da lungo tempo familiarizzato con l'esistenza di varie specie di atomi e con le loro proprietà; ma non ne ha mai visto uno né gli effetti di quest'uno. Egli ha sempre operato soltanto con masse d'innumeri atomi. Quando il chimico riunisce delle sostanze semplici a formare composti oppure li scompone di nuovo nei loro elementi, il numero degli atomi su cui opera in ogni processo, che sia grande abbastanza per essere visibile, è enorme. Nei fenomeni radioattivi invece, osserviamo l'effetto di un atomo alla volta, per cui il progresso è sostanziale. La velocità del proiettile costituito dall'atomo d'elio, velocità centomila volte piú grande di quella con la quale le molecole si muovono ordinariamente nei gas, impartisce a quest'atomo l'energia che gli occorre per venire da noi percepito. Se consideriamo le tracce di nebbia siamo in presenza dell'azione di singoli atomi; vediamo qualcosa che avrebbe stupito ed entusiasmato gli antichi assertori della teoria atomica e cioè un atomo d'elio traversarne uno d'ossigeno ed entrambi accusare l'effetto dell'incontro. Effettivamente utilizziamo questi fenomeni per penetrare nell'essenza degli atomi, usando di quello d'elio come d'una spia.

Capitolo Secondo

LA NATURA DEI GAS

Ora sappiamo che tutte le cose sono fatte con 92 differenti specie di atomi, che racchiudono in sé tutto il mistero e l'infinita varietà del mondo materiale. In ogni atomo si trova un nucleo centrale, affetto da una carica elettrica positiva, intorno al quale vi sono delle cariche d'elettricità negativa, dette elettroni. La carica positiva del nucleo è un multiplo di una determinata carica unitaria eguale, questa, alla carica di un elettrone, ma di segno opposto. Il numero d'elettroni proprio a ciascun atomo è in condizioni normali tale che la loro carica complessiva viene esattamente compensata da quella positiva del nucleo, sicché il complesso atomico risulta elettricamente neutro. Le due cariche totali positiva e negativa si equilibrano. Che gli elettroni ruotino intorno al nucleo come i pianeti intorno al Sole o che sieno dotati di altro piú complicato moto, non ha per noi in questo momento importanza alcuna. Qualche cosa si sa in proposito, ma molto è ancora oscuro. Le conseguenze che dobbiamo trarre da questa singolare disposizione di nucleo ed elettroni si possono ricavare senza bisogno di tener conto d'un possibile moto. Una di queste conseguenze è che in condizioni ordinarie gli atomi non possono penetrare gli

uni negli altri. Ognuno di essi è circondato da un guscio o manto esterno d'elettroni. Quando due atomi s'avvicinano reciprocamente, si respingono probabilmente in causa della forza repulsiva che i due gusci esercitano l'uno sull'altro. Ma se due atomi si urtano con sufficiente velocità, la difesa esterna costituita dal guscio elettronico può venir spezzata e gli atomi si compenetrano l'un l'altro. Quando ciò accade gli atomi possono, dopo la compenetrazione, districarsi nuovamente e continuare la loro traiettoria come se nulla fosse successo; ed anche se l'uno od ambedue gli atomi hanno in questo incontro perduto un elettrone, il danno viene tosto riparato. Solo se il nucleo dell'uno sfiora quello dell'altro atomo, il reciproco moto cambia come nel caso di due palle da bigliardo che si urtano. Variazioni di moto di questo genere avvengono cosí di rado e richiedono un avvicinamento cosí grande dei due nuclei, da indurci a ritenere che i nuclei sieno straordinariamente piccoli. Simili reciproche penetrazioni atomiche ci sono state rese note dagli effetti del radio e sostanze analoghe, come abbiamo spiegato nel primo capitolo, e sono per noi di grande importanza perché ci hanno fatto ritenere che un atomo sia assai lacunare e paragonabile ad un sistema solare. Quando due atomi s'imbattono in condizioni normali, la penetrazione reciproca non ha luogo, perché la velocità d'incontro è troppo pic-

cola. Lo spazio occupato normalmente da un atomo ha un diametro di alcuni centomilionesimi di centimetro. Ed è in questo piccolissimo spazio che elettroni e nuclei eseguono il loro reciproco moto.

Abbiamo detto che tutti gli atomi sono in continuo moto. Con che ha luogo una ininterrotta contesa fra una certa forza d'attrazione che vorrebbe riunire gli atomi e questo perpetuo moto che tende a mantenerli indipendenti. L'esistenza di una forza d'attrazione, che noi teniamo in conto come un fatto assai importante, non sembra a prima vista conciliabile con la struttura atomica or ora descritta, poiché abbiamo supposto che i gusci elettronici esterni impediscano agli atomi di avvicinarsi troppo tra di loro. Ciò non è facilmente comprensibile, poiché ambedue i modi di vedere sono certamente giusti. È indubbiamente la nostra ignoranza sulla natura di queste forze che ne ostacola la giusta interpretazione. Sappiamo che quando due atomi s'avvicinano reciprocamente a grande velocità, possono attraversarsi a vicenda, mentre a velocità piú moderate si respingono dopo l'urto come due palle di bigliardo. Dobbiamo ora fare un passo avanti e indagare in qual modo, quando due atomi si avvicinano con dolcezza, possono realmente rimanere agganciati l'uno all'altro. Tutti conoscono quelle porte automatiche che una volta urtate oscillano innanzi ed indietro prima che il bottone a pressione

riesca a trattenerle in posizione di chiusura. Il che avviene subitamente quando l'oscillazione è diminuita; ed allora, dopo alcune piccole scosse, il moto è cessato. Ciò che vogliamo spiegare è alcunché di analogo. Quando due atomi s'incontrano, la forza repulsiva dei loro gusci elettronici li separa generalmente di nuovo; ma se l'avvicinamento ha luogo lentamente ed i due atomi indugiano l'uno nelle vicinanze dell'altro, qualche cosa ha tempo di avvenire nella disposizione interna dei due atomi, per cui, come nel caso della porta, essi s'agganciano reciprocamente. Tutto dipende da una certa conformazione esterna dell'atomo, per cui si ha generalmente una repulsione; ma questa repulsione si trasforma in attrazione se si dà tempo a due atomi di disporsi adeguatamente oppure di presentarsi l'un l'altro in modo opportuno. Vedremo piú avanti alcuni interessanti esempi di simili processi.

Considereremo ora il caso che le forze d'attrazione fra gli atomi non agiscano, sia per mancanza di tempo oppure debolezza, sia per un'altra ragione qualsiasi. Quando ciò avviene, il complesso degli atomi si presenta sotto forma di gas. Questi casi sono molto numerosi. Vi sono specialmente taluni atomi che ne forniscono esempi notevoli; essi portano i numeri 2, 10, 18, 36, 54, 86; ciò significa che i nuclei di questi atomi manifestano una carica elettrica positiva la cui entità è rappresentata dall'uno o dal-

l'altro dei suddetti numeri e che i nuclei sono normalmente circondati da tanti elettroni negativi quanti sono necessari per neutralizzare la suddetta carica positiva. Sono atomi assai poco propensi ad unirsi tra di loro; non entrano neppure in combinazione con atomi di altra specie per dar luogo a composti chimici; sono i piú riservati fra gli atomi e la loro esistenza era completamente sfuggita fino a pochi anni or sono. Fu solo quando il defunto Lord Rayleigh misurò accuratamente la densità dell'azoto di varie provenienze che s'accorse di una piccola ma evidente discrepanza fra la densità dell'azoto ricavato dalla scomposizione di un composto noto dell'azoto stesso e la densità di quello separato dall'aria e che secondo le vedute di quei tempi (verso il 1892) doveva essere azoto puro. Lord Rayleigh poté dimostrare che la causa della differenza di densità dei due azoti era dovuta alla presenza nell'aria atmosferica di una piccolissima percentuale di un gas formato dai suddetti atomi poco socievoli e mescolato all'azoto. Gli atomi di questo nuovo gas portano il numero 18; il loro nucleo palesa cioè una carica elettrica positiva di 18 unità. Cosí le accurate misure di Lord Rayleigh condussero alla scoperta di questa sostanza fino allora sconosciuta ed alla quale fu dato il nome di « argon », il « pigro ». Forse il nome non svela la sua principale caratteristica; poiché l'atomo d'argon è cosí svelto nei suoi movi-

menti come nessun altro della sua grandezza. L'aria ne contiene circa l'uno per cento in peso, per cui se l'argon avesse la minima tendenza a reagire chimicamente, cioè a formare dei composti con altri elementi chimici, una simile quantità, benché relativamente piccola, sarebbe stata da tempo e facilmente rivelata con i sottili metodi dell'analisi chimica.

L'atomo d'elio, il piú piccolo della serie di questi atomi poco socievoli, è identico con quello espulso dal radio e dalle altre sostanze radioattive nella loro disintegrazione naturale. Esso possiede normalmente due elettroni satelliti; quando però viene proiettato dall'atomo radioattivo attraverso la materia, ne è temporaneamente privo. La carica positiva del nucleo non viene però pregiudicata, sicché quando l'atomo è alla fine del suo volo cattura tosto due elettroni; di questi ve ne sono sempre vaganti d'attorno. Indi l'atomo riprende la sua vita indipendente e tranquilla che gli è propria. Forse la maggior parte dell'elio esistente nel mondo è stato man mano espulso, atomo per atomo, dalle sostanze radioattive. Ad ogni modo lo si trova ove simili processi debbono aver avuto luogo. L'elio viene oggi raccolto in notevoli quantità negli Stati Uniti e nel Canadà ove esce gorgogliando da talune sorgenti. Viene usato per il riempimento dei dirigibili al quale scopo è assai adatto per le sue importanti proprietà. È leggero e la sua forza ascensionale è di poco infe-

riore a quella dell'idrogeno puro, i cui atomi hanno invece un solo elettrone satellite; in linea generale il peso atomico cresce col numero di questi elettroni satelliti. La forza ascensionale di un gas, dobbiamo ricordarlo, non dipende semplicemente dalla sua densità, bensí dalla differenza fra la densità del gas adoperato e quella dell'aria. Le densità dell'idrogeno, elio ed aria stanno fra loro nella proporzione 1:2:14,4; le forze ascensionali dell'idrogeno puro e dell'elio stanno nella proporzione di 1,20:1,14. Ma il principale pregio dell'elio è di non essere infiammabile. L'atomo di idrogeno è invece molto socievole ed in particolare desiderosissimo di unirsi all'ossigeno; sicché quando idrogeno ed ossigeno sono mescolati insieme, basta una minuscola scintilla per iniziare la loro combinazione con fiammata ed esplosione. Perciò un aerostato riempito d'idrogeno è soggetto al pericolo d'incendio; l'elio, invece, non ama cambiamenti di condizione ed il pericolo d'un incendio non esiste. Il nome del gas derivò dalla sua scoperta nel Sole, nello spettro del quale vi era una riga chiara che non si poteva identificare con la riga di nessuno degli elementi allora noti sulla Terra. Perciò si diede all'elemento incognito il nome di « elio » o « sostanza del sole ». Piú tardi soltanto, si riconobbe nell'elio un rappresentante della serie dei gas, al cui esame Lord Rayleigh e Sir William Ramsay furono indotti in conse-

guenza delle ricerche di Lord Rayleigh sull'azoto.

L'atomo, con dieci elettroni, dell'elemento chimico « neon », il « nuovo », è meno comune dell'argon. Possiede la peculiarità di diventar facilmente luminoso sotto lo stimolo di una scarica elettrica e viene di conseguenza sovente usato per riempire bulbi e tubi di lampade ad elettroluminescenza; la luce rosso-arancione delle lampade al neon usate a scopo di pubblicità ci è infatti ben nota.

« Kripton » (36) il « nascosto » e lo « xenon » (54) lo « straniero » sono assai rari. L'ultimo della serie, normalmente con 86 elettroni satelliti, è il residuo della disgregazione dell'atomo di radio e si chiama appunto, come vedemmo a pag. 32, « emanazione del radio ». Anch'esso, come l'atomo d'elio espulso dal radio, tende ad una vita indipendente sicché il radio, quando si disgrega, si trasforma in due gas. In alcune delle fotografie di Wilson (tavola III, fig. A e B) si vedono delle tracce di traiettorie che hanno inizio nel bel mezzo della camera: ognuna è dovuta al disgregarsi a sua volta di un atomo di questo pesante gas, poiché è anch'esso radioattivo. La sua vita media è soltanto di circa cinque giorni e mezzo.

Non dobbiamo però credere che questi atomi così ritrosi non si lascino mai indurre ad associarsi in nessuna circostanza. È infatti possibile raccoglierli in forma di liquido, ma soltanto a temperature estremamente basse. Alla temperatura ordinaria sono

tutti dei gas. La liquefazione dell'elio è uno dei meriti del laboratorio del freddo a Leida, nel quale la produzione delle basse temperature è stata portata a grandissima efficienza.

Esistono poi taluni altri atomi, fra cui l'idrogeno, l'azoto, l'ossigeno, ed altri che si adunano volentieri in piccoli gruppi o molecole, ciascuna delle quali è altrettanto restía ad associarsi con altre dello stesso e sovente anche di diverso genere, quanto gli atomi d'elio o d'argon. Due atomi d'idrogeno costituiscono una molecola molto stabile e poco « socievole »; cosí agiscono anche due atomi di azoto o d'ossigeno. Queste sostanze hanno alla temperatura ordinaria le proprietà di un gas. La liquefazione dell'idrogeno riuscí per la prima volta a Sir James Dewar nel laboratorio della «Royal Institution» ove si conserva ancora l'apparecchio da lui usato nel 1898.

L'aria consta essenzialmente di una miscela di molecole d'ossigeno e d'azoto. Altre note molecole che formano dei gas in condizioni ordinarie sono il monossido o protossido di carbonio (CO), il biossido di carbonio (CO_2) detto anche anidride carbonica, il metano (CH_4) o gas delle paludi e cosí via. In tutti questi casi, quando due di queste molecole s'incontrano a velocità che corrispondono a temperature ordinarie, rimbalzano indietro conservando la propria indipendenza. Quali conseguenze può avere questo stato di indipendenza? Imma-

giniamoci un recipiente chiuso e contenente una quantità indeterminata di atomi o molecole in continuo moto, insomma contenente un gas, come siamo usi dire. Essi urtano continuamente contro i propri compagni e le pareti del recipiente, comportandosi come altrettante palle d'avorio messe in moto su un bigliardo ed il cui movimento, supposto senza attrito, sia perciò perpetuo. In realtà è assai istruttivo utilizzare a scopo dimostrativo un piccolo bigliardo; facendo correre su di esso delle palle, queste ben tosto si fermano, poiché né le sponde né le palle stesse sono perfettamente elastiche; inoltre subiscono una perdita d'energia e quindi di velocità, per attrito contro il panno su cui rotolano, per quanto liscio questo sia. Tuttavia il loro moto, una volta iniziato, dura abbastanza a lungo per darci una idea di ciò che deve avvenire qualora venisse mantenuto indefinitamente.

FIG. 4. Schema di un piccolo bigliardo sperimentale con sponda mobile. Le palle in moto spingono davanti a loro la sponda mobile perdendo in questo lavoro una parte della loro energia. Se invece la sponda mobile viene spinta subitaneamente in avanti, l'energia di moto delle palle cresce.

È naturale domandarsi anzitutto in quale modo la forza di gravità influisce sul movimento degli atomi nel recipiente chiuso. Non li dovrebbe atti-

rare tutti al fondo? Perché invece il gas riempie il recipiente altrettanto bene in alto quanto in basso? La risposta è che la gravità esercita in pieno il suo effetto, ma che questo è cosí piccolo da non essere percettibile nel nostro particolare caso. Immaginiamo ora di privare completamente un gas del suo calore (quindi d'annullare l'agitazione delle sue molecole) e supponiamo che non esistano forze d'attrazione; le molecole o gli atomi del gas finirebbero per cadere in disordine sul fondo del recipiente. Comunichiamo loro adesso un po' di calore: ci sembra di vedere le nostre molecole incominciare a danzare su e giú, come tante palle perfettamente elastiche rimbalzanti su un altrettanto elastico piano. Se il calore comunicato è tale da far segnare al termometro un millesimo di grado centigrado, le molecole rimbalzerebbero fino ad una altezza di circa 30 centimetri. Continuando a fornir loro calore, esse giungerebbero presto ad urtare contro il coperchio del recipiente; supponiamo che sieno cosí poche da inconntrarsi reciprocamente solo assai di rado. Alla temperatura ordinaria il loro moto è però cosí veloce (circa 2000 metri al secondo, se il gas è idrogeno) che la forza di gravità poco riesce ad influire sulla velocità con la quale salgono e discendono, per cui se ne trovano ad ogni istante altrettante in alto quanto in basso nel recipiente. Se sono invece numerose come le molecole dell'aria nelle condizioni normali,

gli urti reciproci sono piú frequenti di quelli contro le pareti. Nell'aria, il libero cammino medio di una molecola fra due urti successivi contro le altre molecole ammonta, nelle condizioni ordinarie, a solo un decimillesimo di millimetro circa. Siccome la gravità non ha alcuna notevole influenza, il nostro bigliardo è un'analogia abbastanza soddisfacente. Potremmo invero ottenere l'effetto della gravità, inclinando leggermente il piano del bigliardo, ma non ne vale la pena. Se gli atomi o molecole urtano continuamente contro le pareti del recipiente, queste debbono risentire una spinta o pressione diretta verso l'esterno; usiamo infatti parlare di una pressione del gas contro le pareti del recipiente che lo contiene. Quando un pallone si gonfia, ciò è dovuto al bombardamento delle pareti interne dell'involucro da parte delle molecole del gas che lo riempie. Se disponiamo una sponda mobile nel nostro bigliardo e facciamo correre le palle, la sponda viene spinta indietro. Se il numero delle biglie venisse raddoppiato, la pressione diventerebbe pure doppia. Questa non è altro che la ben nota legge dei gas, secondo la quale la pressione è proporzionale alla densità del gas, pari restando le altre condizioni. D'altra parte se aumentiamo la velocità delle biglie aumenta anche la pressione contro la sponda mobile; analogamente cresce la pressione di un gas con la temperatura.

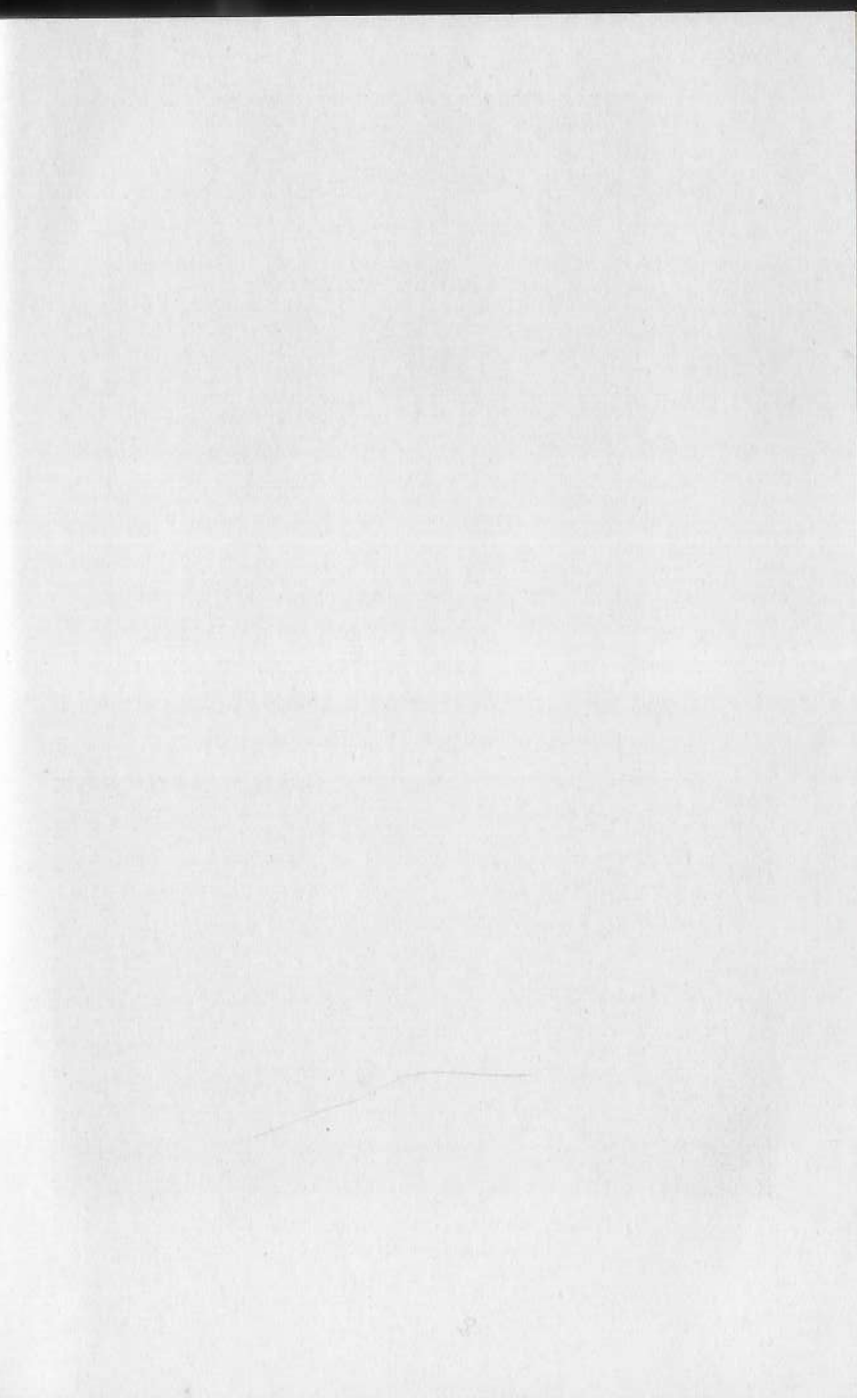
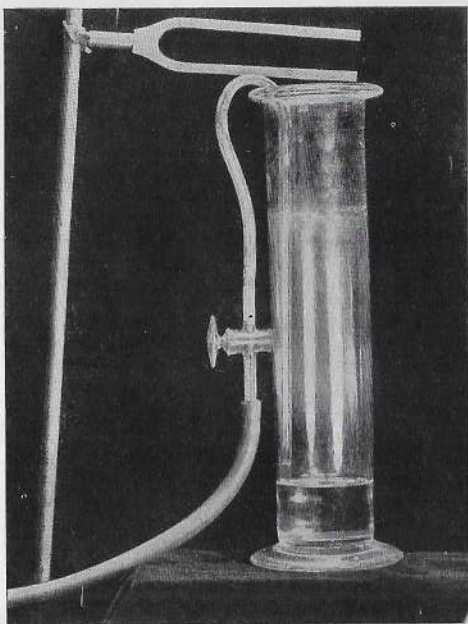



FIG. A. Un diapason su un tubo di vetro.

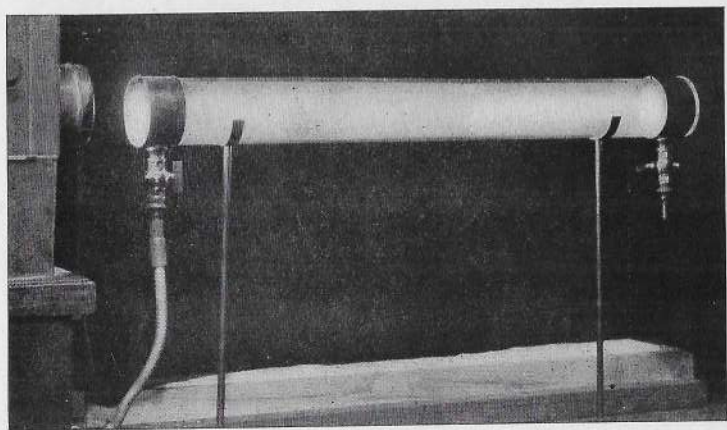



FIG. B. Apparecchio per produrre la nebbia.
Il tubo di vetro è pieno di nebbia.

Spingiamo ora d'improvviso la sponda mobile contro le biglie in moto che la urtano. Si vede come la velocità delle biglie aumenta. Lo stesso avviene col gas quando si spinge verso l'interno una delle pareti del recipiente che lo contiene, per esempio quando spingiamo piú profondamente uno stantuffo in un cilindro di pompa: il moto degli atomi del gas ne viene accelerato. In altre parole: la temperatura del gas si eleva. Tutti sappiamo quanto si riscalda la pompa di una bicicletta quando pompiamo dell'aria nei pneumatici. Ed è vero anche il reciproco: tirando indietro la sponda mobile del nostro bigliardo mentre viene urtato dalle palle, il moto di queste rallenta. Chi gioca al *cricket* sa che per cogliere la palla deve tirare indietro le mani appena vengono da essa toccate: le mani che si ritirano annullano gradualmente il moto della palla. Se le mani sono invece tenute immobili, è certo che la palla ne salta di nuovo fuori. Analogamente si riesce a pigliare una palla mediante una racchetta da *tennis*, ma il movimento di questa deve venire bene regolato poiché la superfice della racchetta è molto rigida. Nel caso del gas, l'effetto corrispondente è il suo raffreddamento mediante espansione. Ne riportammo un esempio nel capitolo precedente, descrivendo il funzionamento dell'apparecchio di Wilson; in questo apparecchio la rapida espansione di una camera piena di aria umida causa un tale raffreddamento

che l'umidità si deposita sotto forma di nebbia lungo le traiettorie degli atomi d'elio. L'espansione deve avvenire in certo qual modo improvvisamente, affinché il calore esterno non abbia tempo di entrare, impedendo il necessario abbassamento di temperatura.

L'espansione o dilatazione di grandi masse d'aria nell'atmosfera conduce sovente alla pioggia ed alla neve. Nel gioco ininterrotto dei venti, grandi quantità d'aria umida possono espandersi verso regioni di minor pressione e diventare cosí fredde da provocare la condensazione del proprio vapore acqueo. L'esperimento si può facilmente riprodurre in scala ridotta. Il tubo di vetro visibile in fig. B della tavola VI è pieno d'aria fatta gorgogliare nell'acqua, epperciò carica d'umidità. Chiudiamo il rubinetto d'introduzione dell'aria ed apriamo invece quello all'altro estremo del tubo, mettendo questo in comunicazione con una pompa per fare il vuoto; tosto l'aria nel tubo si rarefà e subito una bianca nebbia riempie il tubo. La nebbia si può illuminare facendovi cadere sopra un fascio di luce proiettato dalla lampada che si trova a sinistra in figura. Possiamo evacuare il tubo per mezzo della pompa e ripetere l'esperienza quante volte lo desideriamo. Ogni volta che riempiamo il tubo con aria umida, accuratamente liberata mediante filtratura da tutte le particelle di pulviscolo e fumo contenutevi in so-

spensione, otteniamo lo stesso tipo di bianco velo che talora vediamo in campagna ove l'aria è pura. Ma se introduciamo direttamente nel tubo l'aria ambiente senza filtrarla, l'espansione è causa di quella densa nebbia che l'aria di Londra, e di tante altre città tormentate da polvere e fumo, produce cosí volentieri.

Il bigliardo può aiutarci a comprendere ulteriori proprietà dei gas. Mescoliamo alle ordinarie biglie d'avorio un certo numero di leggere palline da *ping-pong* e mettiamo l'insieme in agitazione. Tosto le palline da *ping-pong* acquistano velocità maggiori delle altre. Avviene la stessa cosa in un gas che contenga due specie di atomi, l'una leggera, l'altra pesante. Gli atomi leggeri, nel continuo reciproco scambio d'energia, assumono una velocità media piú elevata di quelli pesanti. In un miscuglio gassoso di idrogeno ed ossigeno le molecole del primo si muovono in media quattro volte piú velocemente di quelle del secondo elemento. Un calcolo, nel quale non vogliamo qui entrare, ci conferma che, in un miscuglio di diverse specie di atomi, tutti questi possiedono la stessa energia media, i piú leggeri compensando il loro minor peso con una maggior velocità. Questa regola vale anche quando i gas non sono mescolati tra loro, bensí contenuti in recipienti separati, sempre supposto che la loro temperatura sia la stessa. Gli atomi di due gas non mescolati tra loro

non possono in verità scambiarsi ed equilibrare direttamente la propria energia; ma questo scambio avviene attraverso quelle diverse sostanze che riempiono lo spazio fra i due gas: le pareti dei recipienti, il tavolo che li sorregge, l'aria ambiente. In realtà la velocità media del moto atomico dipende dalla temperatura.

Possiamo facilmente illustrare questo fenomeno con un esempio. Il suono, quando si propaga in un gas, viene trasmesso da atomo ad atomo, cosí come una catena di uomini si passano delle secchie d'acqua per spegnere un incendio. Quanto piú rapidamente gli uomini muovono le braccia e le mani, tanto piú sveltamente viaggia l'acqua. Analogamente il suono si propaga tanto piú rapidamente quanto piú grandi sono le velocità degli atomi; oppure, ciò che è lo stesso, quanto piú gli atomi sono leggeri. Una canna d'organo alimentata con gas illuminante emette una nota piú alta che alimentandola con aria, perché le molecole del gas illuminante sono piú leggere, epperciò si muovono piú rapidamente di quelle d'aria e le vibrazioni della colonna di gas diventano piú frequenti. Un'esperienza molto semplice servirà a chiarire la cosa. Nella fig. A della tavola VI vediamo una provetta di vetro, nella quale versiamo dell'acqua finché la colonna d'aria sovrastante entra in vibrazione rinforzando il suono del diapason (corista) tenuto sopra la provetta. Le molecole d'aria

nel tubo vibrano con lo stesso ritmo del corista. In altre parole: la colonna d'aria entra in risonanza; ciò perché il suo periodo proprio di vibrazione è eguale a quello del corista, come possiamo assicurarci soffiando leggermente contro l'orlo della provetta; si ode un flebile suono di altezza identica a quello emesso dal diapason. Se ora introduciamo nella provetta del gas illuminante per mezzo di un tubo di gomma, il suono svanisce perché il periodo proprio di vibrazione della colonna di gas non è piú quello del corista. Se leviamo un po' d'acqua dalla provetta e ricominciamo l'esperienza con l'aria, la provetta non risponde al diapason finché non mescoliamo all'aria una certa quantità di gas. La nota si fa sentire di nuovo e si rinforza al massimo appena la miscela è tale che il periodo proprio di vibrazione della colonna d'aria e gas torna identico a quello del corista.

Immaginiamo ora che nella parete di un tubo contenente del gas si sia praticato un piccolissimo foro. Ogni volta che un atomo o molecola (se tale è il caso che sia) incontra il forellino, passa dall'altra parte della parete e non ritorna piú indietro. È chiaro che un gas leggero sfuggirebbe piú presto di uno pesante perché i suoi atomi si muovono piú rapidamente nel recipiente ed il numero di essi che incontrano ad ogni secondo il foro d'uscita è maggiore. Questo comportamento viene talora utilizzato

per separare due gas quando falliscono tutti gli altri mezzi. Vi ricorsero per esempio Rayleigh e Ramsay per separare l'argon dall'azoto atmosferico. Essi fecero passare la miscela entro una serie di cannule da pipa d'argilla e l'azoto sfuggiva piú rapidamente attraverso i pori delle cannucce che non l'argon. L'atomo d'argon è quaranta volte piú pesante dell'atomo d'idrogeno, la molecola di azoto invece ventotto volte; perciò l'azoto passa piú rapido per i pori delle pareti delle cannule, sicché il gas uscente all'altro estremo del sistema di tubetti d'argilla è piú ricco in argon, che non la miscela che vi viene fatta entrare.

La diffusione di un gas nell'altro è in sostanza un processo dello stesso genere giacché gli intervalli fra gli atomi o le molecole di un gas sono paragonabili ai pori delle cannucce d'argilla. La diffusione è un processo assai lento (ad onta del fatto che gli atomi si trovino in rapida agitazione) perché gli urti sono troppo numerosi. Si potrebbe pensare che un gas dovrebbe diffondersi molto rapidamente in un altro inquantoché, se si lascia per esempio aperto un rubinetto di gas illuminante, il suo odore si percepisce rapidamente in tutto l'ambiente. Ma questa dispersione è piuttosto dovuta a correnti di convezione che non a diffusione vera e propria: il gas illuminante fluisce in forma concentrata attraverso l'aria. Il fumo di una sigaretta dà un'ottima idea

del fenomeno (tavola VII). Posando la sigaretta sul portacenere un sottile filo di fumo bluastro sale serpeggiando per poi allargarsi, piegarsi e torcersi in delicate spirali e superfici curve. Mescolandosi infine con l'aria, il fumo dà l'esempio di una convezione. Ha pure luogo durante tutto il processo una diffusione fra la corrente d'aria carica di fumo e quella pura ambiente; ma il processo è cosí lento che i contorni della nuvoletta rimangono netti ancora per lungo tempo. Avviene la stessa cosa quando una stanza viene riscaldata ad aria calda: la distribuzione del calore procede per correnti di convezione, cioè per correnti di aria calda che s'insinuano nell'aria fredda ambiente. Non è quindi dovuta alle molecole di aria calda aprentisi singolarmente la via fra le molecole d'aria fredda; questo processo si verifica pure, ma solo assai lentamente. La convezione è piú efficace della conduzione.

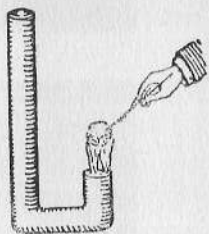



FIG. 5. Dalla « Chemistry of a Candle » di Faraday

Il moto di una massa di gas caldo in uno freddo è naturalmente governato dalla legge di gravità: la sostanza piú leggera, se si mantiene compatta, tende a salire verso l'alto in quella piú pesante. Il fumo della sigaretta monta perché l'aria sopra l'estremità incandescente della sigaretta è riscaldata epperciò

alleggerita; da ogni lato fluiscono allora correnti d'aria fredda che s'incontrano e salgono insieme intorno al sottile filo di fumo. Il quale fa loro da limite comune; quando l'aria è tranquilla e le correnti

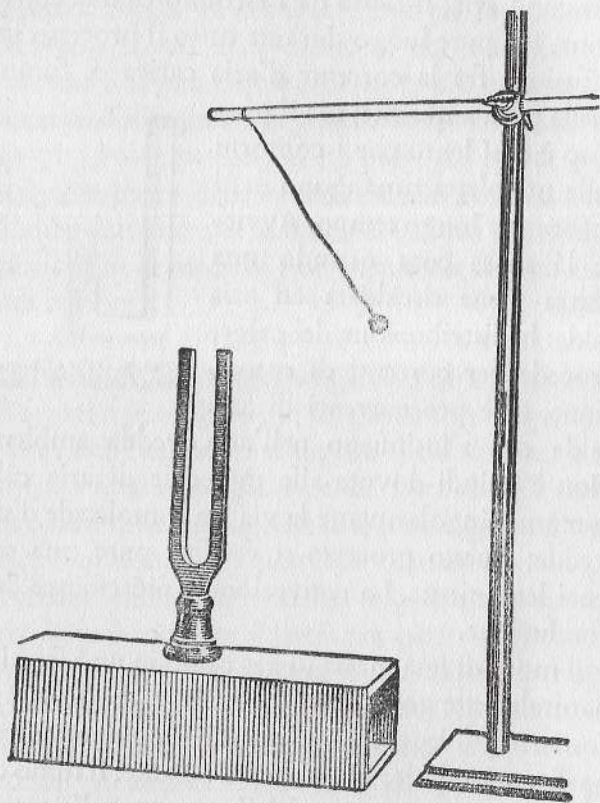
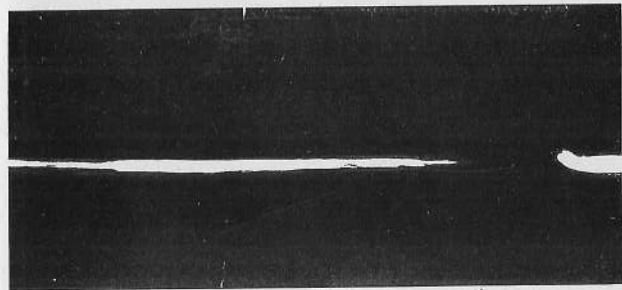
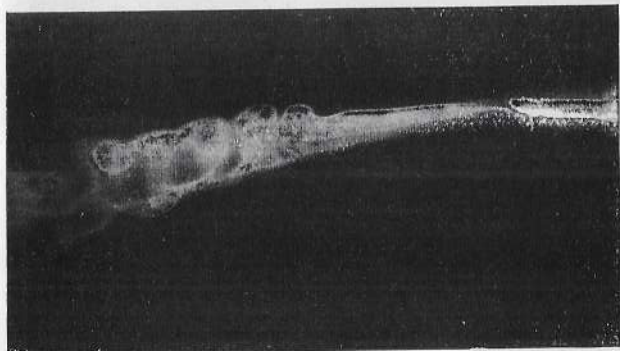
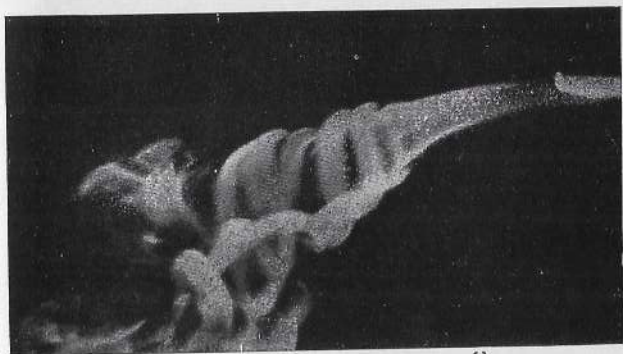



Fig. 6. Corista e pallina di midollo di sambuco.
La pallina di midollo di sambuco viene energicamente respinta dal diapason vibrante.

TAVOLA VII.

Fumo di sigaretta.

A. Il fumo di sigaretta sale come un filo diritto verso l'alto. Tutt'all'intorno l'aria è trascinata in su col fumo, ciò che non si può vedere in una fotografia; il fumo è il nocciolo d'una corrente d'aria ascendente.

B. e C. Qui la sigaretta è stata mossa proprio nell'istante prima di prendere la fotografia. Le correnti ascendenti d'aria salgono parallelamente tra loro a partire dalla punta della sigaretta, ondeggiano e s'intrecciano reciprocamente, conservando però la loro individualità. Benché le particelle di fumo sieno in moto, i fili di fumo non si mescolano tra loro oppure solo leggermente per diffusione; se non fosse cosí il fumo si fonderebbe in una massa amorfa. Correnti d'aria che s'incontrano, si mescolano piú per convezione che per diffusione.

TAVOLA VIII.

A

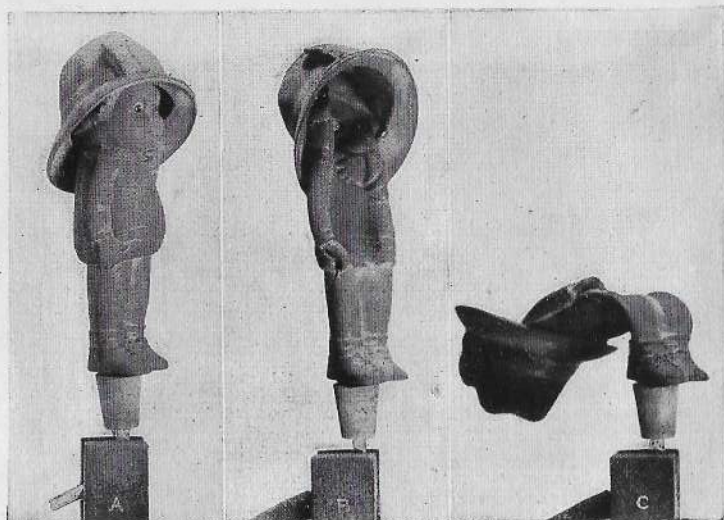



FIG. A. La bamboletta di gomma s'accascia quando viene collegata alla pompa per il vuoto.

B

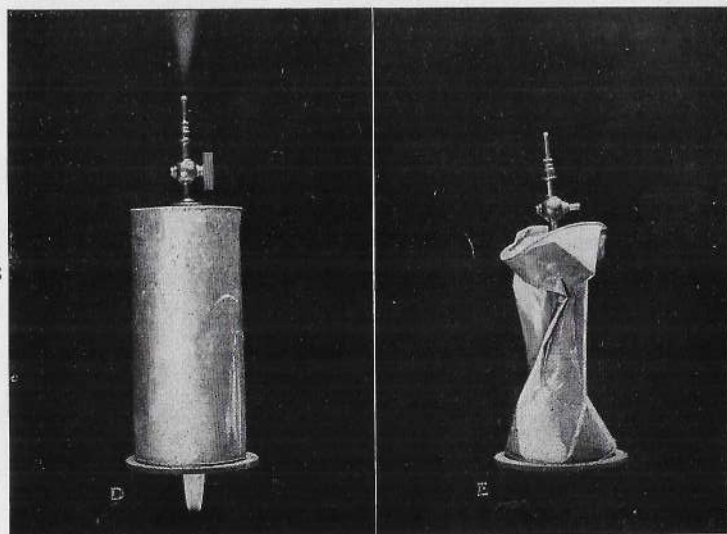



FIG. B. L'acqua del recipiente di stagno stava bollendo vigorosamente quando gli si levò di sotto il becco Bunsen e si chiuse il rubinetto superiore. Irrorato d'acqua fredda, il recipiente si schiacciò.

d'aria sono continue ed uniformi, la colonnina di fumo procede diritta verso l'alto; ma basta un leggero movimento della sigaretta per distruggerne il regolare deflusso e la colonnina si piega in eleganti volute. Ognuno sa certamente in qual modo un camino produce un tiraggio; ma può tuttavia interessare la riproduzione di una antica esperienza di Faraday. Un batuffolo di stoppa imbevuta d'alcool venga tenuto acceso e tenuto sopra la bocca del ramo piú corto di un tubo piegato come in fig. 5. Soffiando un momento sulla fiamma, si può costringerla a discendere per il ramo corto e risalire per quello lungo del tubo; cessando di soffiare, la fiamma continua a dirigersi verso il basso. Negli ospedali i condotti del fumo delle stufe passano spesso, seguendo questo principio, sotto il pavimento. Il moto si basa naturalmente sul fatto che la colonna d'aria calda nel ramo lungo è piú leggera di una corrispondente colonna d'aria ambiente. Talora, in casa, può avvenire il contrario quando il caminetto è piú freddo dell'aria esterna ed allora una corrente carica di fumo fuligginoso si riversa in basso nella camera.

Qualche cosa di piú affine ad un processo di conduzione ha luogo nel riscaldamento di un gas attraverso le pareti di un recipiente. Quando le molecole urtano, nel corso dei loro movimenti, contro la parete, ricevono un impulso dalle vibrazioni del materiale di questa, press'a poco come la pallina di

midollo di sambuco in fig. 6 riceve un vigoroso urto dal rebbio oscillante del corista.

Le bottiglie inventate da Sir James Dewar per la conservazione dell'aria liquida, da lui ottenuta per la prima volta, sono a doppia parete; l'aria fra l'una e l'altra viene estratta mediante una pompa (fig. 7).

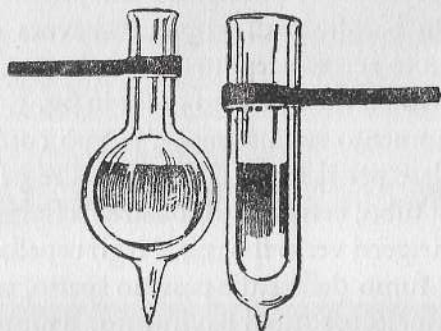



FIG. 7. Recipienti per la conservazione dell'aria liquida.
Si osservi l'appendice in basso (chiusa mediante saldatura) attraverso la quale è stata estratta l'aria fra le pareti interna ed esterna dei due recipienti di vetro.

Non vi sono molte molecole che possano caricarsi d'energia al contatto della parete esterna e cederla all'interna. Perciò all'aria liquida non viene comunicato alcun calore né per conduzione né per convezione. Il calore si propaga però anche per irradiazione attraverso l'etere; vi si può ovviare argentando le facce interne dell'intercapedine. Allora l'isolamento termico dell'aria liquida è quasi per-

fetto. Questo principio è lo stesso usato per le bottiglie « thermos ».

Dalla completa indipendenza degli atomi o molecole di un gas risulta la sua perfetta divisibilità. Tagliando un corpo solido con un coltello, dobbiamo spendere una certa energia per separare le molecole le une dalle altre; ma in un gas queste forze di coesione sono insignificanti. Se un oggetto si muove attraverso l'aria, esso incontra una resistenza solo perché è necessario di mettere in moto una certa quantità d'aria, ciò che rappresenta un dispendio d'energia. I gas sono per loro natura leggeri e l'energia richiesta per spostarli è corrispondentemente piccola. Data la leggerezza dell'aria e la facilità con la quale ci muoviamo in essa dimentichiamo facilmente quanto elevata è la pressione dell'aria sulla superfice della Terra e quanto grande è il peso dell'aria in uno spazio paragonabile a quello di un'aula da conferenza. L'aria esercita una pressione di oltre dieci tonnellate su ogni metro quadrato di superfice del nostro corpo. Non veniamo schiacciati da questa formidabile pressione per il fatto che anche l'aria che si trova nell'interno del nostro corpo è praticamente alla stessa pressione di quella esterna. La bambolina della fig. A in tavola VIII s'accascia e si schiaccia completamente, se ne leviamo l'aria. Il recipiente di stagno dalle pareti sottili della fig. B nella stessa tavola VIII era stato dapprima riempito

con un po' d'acqua; questa venne fatta bollire in modo che il vapore espellesse tutta l'aria dal recipiente; chiusa l'apertura in alto mediante rubinetto, si è versata sul recipiente dell'acqua fredda. Condensato in tal modo il vapore interno, la pressione entro il recipiente scese quasi a zero. Per cui il recipiente si schiacciò sotto la pressione esterna, non piú equilibrata da quella interna. Forse si afferra meglio la grandezza della pressione dell'aria se si considera che una sbarra di ferro avente una sezione quadrata di 1 centimetro di lato, lunga un metro e venticinque centimetri e posta in piedi su un tavolo, esercita, sul centimetro quadrato di tavolo su cui s'appoggia, una pressione per effetto del suo peso all'incirca equivalente a quella dell'aria.

Se perciò teniamo in dovuto conto il peso dell'aria non deve sorprendere che ci occorra tanta forza per metterla in rapido movimento oppure che, mossa rapidamente, possa esercitare una grande pressione su un corpo qualsiasi che si trovi sulla sua strada. Ognuno di noi conosce la pressione del vento e sa quali danni può causare una burrasca. Cosí anche l'elica rotante di un aeroplano spinge all'indietro una massa d'aria con grande velocità e la grande forza di reazione imprime all'aeroplano la necessaria spinta in avanti. Analogamente quando l'aeroplano vola tende, al pari di un uccello, a cadere ed a trascinare con sé le masse d'aria che gli si trovano

sotto e d'attorno. Ma per mettere in moto simili masse d'aria occorre della forza ed è per reazione che l'aeroplano si sostiene per aria. Se l'aeroplano non si muovesse in avanti, peserebbe sull'aria sotto di sé e cadrebbe con essa; ma esso vola incessantemente su nuove masse d'aria che non hanno ancora cominciato a cadere. Una semplice esperienza illustrerà meglio queste cose. Un pezzo

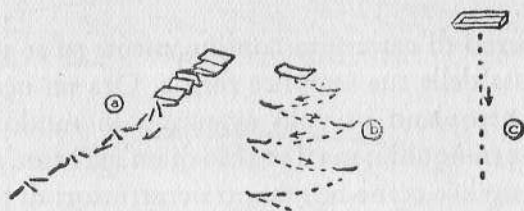



FIG. 8. *a*) Successive posizioni di un foglio di carta mentre sta cadendo. *b*) Un foglio di carta a bordi un pò sollevati cade a zig zag. *c*) un foglio di carta a bordi ben ripiegati cade verticalmente.

di carta di conveniente grandezza, diciamo di sette centimetri, venga lasciato cadere come in fig. 8 *a*; esso gira di continuo su se stesso e raggiunge il suolo dopo percorsa una linea declive. Il senso di rotazione del foglio sta alla sua direzione di discesa come il senso di rotazione di una palla rispetto alla direzione di un piano inclinato lungo il quale rotoli, aderendo però alla sua faccia *inferiore*.

Lo spigolo anteriore del foglio di carta penetra continuamente in nuova aria che non ha ancora incominciato a cadere, mentre la metà posteriore

del foglio s'appoggia su dell'aria che ha già iniziato il suo moto di discesa sotto la pressione della metà anteriore del foglio, che poco prima vi si appoggiava sopra. Cosí la seconda metà del foglio cade ma la prima no, per cui il foglio gira su se stesso come è mostrato dal disegno, finché comincia di nuovo a scivolare in avanti. Ora però si trova davanti lo spigolo che prima era dietro ed il gioco si ripete.

Il pezzo di carta gira continuamente su se stesso in causa della sua semplice forma. Ora un uccello o un aeroplano in volo avanzano in modo elegante e tranquillo; ma il profilo di un'ala è tutt'altro che semplice come ben sanno i costruttori di aeroplani. La forma esatta di un aeroplano (che in verità non è affatto piano) e specialmente del bordo d'attacco delle ali è ricca d'importanti sottigliezze. L'uccello usa le sue ali non solo per il volo veleggiato ma anche per quello battente, al quale scopo le ali si prestano meravigliosamente, inquantoché un'ala può considerarsi come una serie di valvole che si aprono quando l'ala si eleva e si chiudono quando si abbassa; sicché vi è meno pressione sull'ala nel colpo verso l'alto che in quello verso il basso. Il movimento ricorda un po' quello del piede palmato di un'anitra, che si apre ed esercita sull'acqua una pressione maggiore quando l'animale lo spinge all'indietro di quando lo trae in

avanti; il meccanismo è però del tutto differente.

La costola della penna non si trova sempre lungo la mezzeria della penna medesima, bensí sovente alquanto a lato ed una fila di penne è disposta lungo l'ala in modo che le penne si sovrappongano e possano girare un po' intorno all'asse rappresentato dalla costola. Quando l'uccello solleva l'ala, le penne

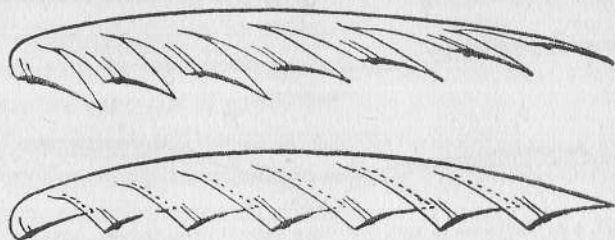



FIG. 9. Disegno, secondo Lilienthal, nel quale si vedono in alto le penne che si aprono mentre l'ala batte nel moto d'ascesa; in basso, invece, chiudersi nel colpo dell'ala verso il basso.

si staccano l'una dall'altra come le stecche di una gelosia e lasciano perciò passare l'aria; quando invece l'ala viene abbassata, le aperture fra le penne si richiudono, poiché queste si appoggiano l'una all'altra e l'ala presenta una superfice continua. I due disegni della fig. 9 sono stati presi dal *Volo degli uccelli* di Otto Lilienthal, pag. 101, e rappresentano un'ala di condor. Lilienthal dice: «Chi ha osservato il volo delle cicogne sa che si può periodicamente vedere attraverso le loro ali». Ciascuna delle innumeri barbe di ogni singola penna parte-

cipa a questo effetto valvolare. È chiaro che con un simile meccanismo già il semplice battere delle ali deve fornire una spinta verso l'alto, astraendo da ogni altra caratteristica del moto. L'avanzamento è realizzato ruotando leggermente l'ala intorno al suo rigido bordo d'attacco (spigolo anteriore) come è visibile nei due disegni della fig. 9 A, tolta dalla stessa opera di Lilienthal a pag. 96. Si tratta del volo

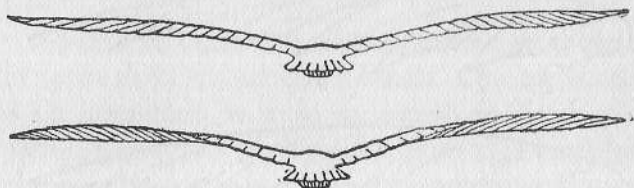



FIG. 9 A. Gabbiano in volo. Nel colpo verso il basso dell'ala, questa si è un pochino girata mostrando in figura la sua faccia inferiore. Il risultato di questo movimento è una spinta in avanti.

di un gabbiano sotto il sole: quando l'ala si solleva, le sue parti posteriori si piegano verso il basso e si vede cosí la faccia superiore illuminata dell'ala; quando l'ala s'abbassa, si torce in modo da mostrare la sua faccia inferiore piú oscura. È da ammettersi che anche ad ali tese ed immobili l'uccello risenta una spinta verso l'alto quando l'aria è animata da piccoli movimenti di carattere vorticoso ed irregolare o fluttuante. Lo splendido volo a vela degli uccelli, che viaggiano per chilometri senza muovere le ali o sforzo apparente, è concepibilmente legato a questa condizione di cose; si dice che quando l'aria

è perfettamente calma il volo a vela degli uccelli non è riscontrabile.

Un esempio assai grazioso delle leggi dell'aerodinamica è offerto dalla deviazione della traiettoria di una palla che ruota su se stessa. Lo si conosce e lo si usa in molti giochi benché si manifesti forse piú chiaramente in quello del *golf*, nel quale la palla lanciata assume una forte velocità. Supponiamo che il giocatore di *golf* «tagli» la sua palla; invece di procedere rettilinearmente nella direzione della percossa, essa piega verso destra. La palla gira su se stessa; la sua faccia anteriore ruota da sinistra verso destra rispetto al giocatore che la guarda partire; la posteriore da destra a sinistra. È chiaro che il giocatore non ha colpito in pieno la sua palla, ma nel dare il colpo col bastone ha strisciato un po' lungo la superficie di essa; forse ha ritirato leggermente il suo braccio nell'istante del colpo e non accompagnata bene la palla fino alla fine. Mentre la palla vola, si forma davanti ad essa un denso cuscinetto d'aria che non ha tempo di scorrer via. Se la palla gira, come abbiamo sup-

FIG. 10. Il volo di una palla da *golf* «tagliata». Il tratteggio indica il punto ove l'aria viene addensata dalla palla rotante e questo cuscinetto d'aria piú densa costringe la palla a spostarsi verso la destra.

posto, la parte sua sinistra (vista dal giocatore) ruota in avanti nella direzione del volo mentre quella destra ruota all'indietro. Ne consegue che, in causa dell'attrito fra la palla e l'aria, questa viene sulla sinistra trascinata in avanti piú che sulla destra ed il cuscinetto d'aria davanti alla palla è piú denso a sinistra che a destra. Di conseguenza la palla devia verso destra.

La lunga corsa di una palla da *golf* è sempre dovuta al fatto che il giocatore le comunica l'appropriato moto di rotazione: la percossa dev'essere tale che la palla ruoti intorno ad un asse orizzontale e precisamente in modo che la faccia rivolta verso terra ruoti in avanti e la faccia verso il cielo ruoti all'indietro, verso il giocatore. Allora la palla tende a sollevarsi dal suolo mentre vola. Talora si riesce ad osservare come realmente la palla descriva una curva convessa verso il basso. Senza tale effetto la palla non arriverebbe a metà della distanza cui realmente giunge. Se poi non ci fosse aria affatto, sia detto per incidenza, il percorso della palla sarebbe da due a tre volte maggiore del normale poiché l'aria oppone una grande resistenza ad una palla che si muova rapidamente. Potremmo lanciare la palla molto piú lontano se potessimo abolire la resistenza dell'aria; ma siccome ciò non è possibile, cerchiamo di trarne profitto nel miglior modo impartendo alla palla un moto rotatorio.

La traiettoria di una palla da *rugby* è sovente curvata verso l'alto — al pari di quella d'una veloce palla da *golf* — quando la punta del piede ha colpito la palla piuttosto in basso. Sebbene l'effetto sia naturalmente piú evidente nel volo contro vento, pure crediamo che sia osservabile anche in aria tranquilla. Nel *tennis* il giocatore sposta volentieri la racchetta verso l'alto nel dare il colpo alla palla, la quale ne riceve di conseguenza una rotazione in

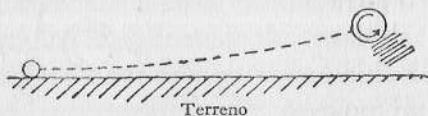



FIG. 11. Il volo di una palla da *golf*: un cuscinetto di aria piú densa, indicato in tratteggio, spinge la palla verso l'alto.

senso opposto a quella descritta nel caso del *golf* e precisamente in modo che la faccia superiore della palla si sposti piú rapidamente in avanti di quella inferiore.

Allora la traiettoria della palla si piega piú fortemente verso il basso, tanto che, sebbene fortemente colpita, cade entro il campo avversario subito dopo aver superata la rete. Palle pesanti deviano meno di palle leggere procedenti con egual velocità. Comunque sia, il metodo piú semplice per studiare il fenomeno è forse di ricorrere ad un palloncino da ragazzi; i palloncini oggi sul mercato presentano una sufficiente resistenza ai colpi che ricevono. È facile,

colpendone uno con la mano o con una racchetta, di impartirgli ogni genere di rotazione e d'osservare come viene « tagliato ».

I vari esempi di proprietà dei gas che abbiamo finora considerati si spiegano, come abbiamo visto, con l'ipotesi che talune specie di atomi hanno pochissima tendenza di associarsi con altri atomi della stessa o d'altra specie; li abbiamo perciò chiamati atomi poco « socievoli ». Altri atomi poi, come quelli d'idrogeno o d'ossigeno, benché individualmente lo sieno molto, tendono pure a formare molecole poco socievoli.

FIG. 12. Effetto del taglio su una palla da *tennis*: la palla segue una stretta curva (esagerata nel disegno) cadendo poco lontano dalla rete. A destra: sezione della racchetta e della palla prima del colpo; la freccia indica la direzione del moto della racchetta.

L'aria consta appunto di una miscela di atomi e di molecole di questo genere: molecole di ossigeno, ciascuna delle quali consta di due atomi; molecole di azoto pure biatomiche; alcune molecole di anidride carbonica formate da un atomo di carbonio e due di ossigeno; un certo numero di atomi singoli indipendenti di argon e tracce di altri gas. Tutti

formano dei gas poiché manca loro la tendenza d'associarsi; l'indipendenza che perciò possiedono, insieme al loro perpetuo moto, ci facilitano la comprensione del loro comportamento.

Ora ci si presenta il seguente problema: come rientrano le proprietà di questi atomi nel quadro generale della struttura atomica che abbiamo esposto nel precedente capitolo? Come si può conciliare la concezione planetaria dell'atomo con la sua tendenza di associarsi o non associarsi, con la formazione di molecole dalle analoghe tendenze e cosí via? Per rispondere in modo esauriente a queste domande dovremmo addentrarci nelle teorie della chimica moderna e ciò ci condurrebbe in verità troppo lontano. Ma esistono certe semplici regole, le quali, benché inspiegabili e sebbene soffrano alquante apparenti eccezioni, ci possono servire utilmente da guida per collegare i nostri fatti. Ritorniamo agli atomi poco socievoli aventi i numeri 2, 10, 18, 36, 54, 86. La prima cosa che ci colpisce in questa serie è una curiosa relazione fra i suoi termini. Se infatti scriviamo le successive differenze, incominciando dallo zero, otteniamo: 2, 8, 8, 18, 18, 32. I numeri 2, 8, 18, 32, sono i doppi dei quadrati di 1, 2, 3, e 4. Abbiamo già detto che le differenze fra le diverse specie di atomi sono semplicemente differenze numeriche. Ci siamo astenuti dall'esporre le prove sperimentali e teoretiche del numero d'elettroni

proprio a ciascuna specie atomica: queste prove sono complicate, ma i risultati sono semplici e sufficienti al nostro scopo. Ora, siccome il numero degli elettroni dell'atomo o, detto piú esattamente, il numero che esprime il valore della carica positiva del nucleo, è già per se stesso di eccezionale importanza, non possiamo fare a meno di pensare che anche questa curiosa relazione fra le differenze numeriche dei numeri atomici abbia un suo profondo significato. La probabilità è ancor maggiore se consideriamo la questione da un altro punto di vista.

I chimici hanno da tempo fatto rimarcare che esistevano delle notevoli analogie fra le proprietà di diverse specie atomiche. Al nostro scopo conviene di piú d'esprimere le loro scoperte sotto forma di relazioni numeriche nel modo che ora vedremo. Incominciamo con i primi otto atomi, tralasciando l'idrogeno, che è il primo della serie, e sotto questi primi otto atomi scriviamo gli otto successivi a partire dal neon; sempre procedendo in ordine numerico, possiamo scrivere sotto le precedenti un'altra serie di otto atomi ottenendo la seguente tabella:

Elio 2	Litio 3	Berillio 4	Boro 5	Carbonio 6	Azoto 7	Ossigeno 8	Fluoro 9
Neon 10	Sodio 11	Magnesio 12	Alluminio 13	Silicio 14	Fosforo 15	Solfo 16	Cloro 17
Argon 18	Potassio 19	Calcio 20	e cosí via.				

(Vedasi anche la fig. B della tavola IV per dei modelli rudimentali di questi atomi.)

In realtà ciò che abbiamo ora scritto è una parte del famoso sistema periodico degli elementi. Essa è stata disposta in modo che gli atomi d'elio, neon ed argon, identici nella loro caratteristica proprietà d'essere poco socievoli, vengano a trovarsi l'uno sotto l'altro nella stessa colonna. Si verifica allora che litio, sodio e potassio, che pure sono molto simili tra loro in quanto a proprietà, vengono parimenti a trovarsi l'uno sopra l'altro nella colonna successiva e che la medesima singolare relazione si ripete per le altre colonne. Moltissime sono le proprietà con le quali svelano la loro parentela le sostanze di una stessa colonna; questa analogia fra gli elementi di una stessa colonna costituisce una delle piú notevoli caratteristiche della chimica. Il nome « sistema periodico » è in sé una descrizione di questo fatto.

Ora si può ragionevolmente supporre che le proprietà di un atomo, come si palesano nelle sue relazioni con gli altri atomi, possano dipendere dalla configurazione dei suoi elettroni e specialmente di quelli che si trovano piú prossimi alla periferia dell'atomo e che per primi entrano in questione quando due atomi si avvicinano tra loro. Cosí è probabile che il litio, il sodio ed il potassio si comportino analogamente perché la disposizione dei loro elettroni esterni è la medesima; cosí il carbonio ed il silicio, il fluoro ed il cloro, ecc.

Queste considerazioni hanno condotto alla seguente ipotesi: supponiamo che i due elettroni dell'elio costituiscano un primo strato o guscio di elettroni intorno al nucleo, comune a tutti gli atomi successivi del sistema periodico. Incominciando dal litio, che viene subito dopo l'elio, si formi un secondo guscio d'elettroni concentrico ed esterno al primo; nel caso del litio il rappresentante di questo secondo guscio è un solo elettrone, poiché il litio ne ha in totale tre. Procediamo: il berillio ha quattro elettroni, due nel primo guscio, due nel secondo; il boro ne ha cinque: due nel primo guscio, tre nel secondo; il carbonio ha quattro elettroni nel secondo guscio, l'ossigeno sei, il fluoro sette. Viene quindi il neon con otto elettroni nel secondo guscio: facciamo l'ipotesi che questo guscio sia completo con otto elettroni e che gli atomi con un numero maggiore di elettroni possiedano un primo guscio di due elettroni, un secondo completo di otto elettroni, mentre gli ulteriori elettroni prendano il loro posto in un terzo guscio e cosí via. Allora il sodio avrà, come il litio, un solo elettrone nel gruppo piú esterno, il magnesio due come il berillio, ecc. Al cloro, al pari del fluoro, manca un solo elettrone per completare questo secondo gruppo di otto elettroni, mentre l'argon, come il neon, l'ha completo. Ma già prima dell'argon e precisamente con il sodio ha inizio il terzo guscio che è completo solo con

diciotto elettroni, mentre il quarto guscio, che comincia col potassio finisce per ospitarne ben trentadue. Ma non ci occorre continuare nella nostra enumerazione, che con gli atomi di numero piú elevato diventa sempre piú complicata.

Questo modo di vedere lascia intendere perché i membri di una stessa colonna sono analoghi nelle loro proprietà. Ma che cosa hanno a che fare le proprietà di un atomo con il particolare numero di elettroni del guscio piú esterno, numero che è identico per tutti i membri di una stessa colonna? Anche a questa domanda possiamo trovare una specie di risposta che esprimeremo nel seguente modo.

Dalla grande varietà di leggi chimiche riguardanti la tendenza degli atomi a formare composti, in altre circostanze a dissolvere le combinazioni esistenti per formarne delle nuove, emergono talune regole, che appaiono direttamente in relazione col numero degli elettroni esistenti nel gruppo o guscio piú esterno. In primo luogo esiste sempre la tendenza di riempire i posti vacanti di un gruppo incompleto. Se per esempio il cloro avesse un elettrone di piú nel suo guscio piú esterno, questo gruppo sarebbe completo. Di conseguenza il cloro è alla cerca, per cosí dire, dell'elettrone che gli manca epperciò tende a strapparlo ad altri atomi che non lo sanno trattenere con sufficiente energia. È vero

che allora va perduto l'equilibrio nelle cariche elettriche dell'atomo, inquantoché l'elettrone estraneo comunica all'atomo una carica negativa; ma ad onta di ciò una forza, di cui non conosciamo l'origine, lavora in modo da completare il guscio esterno di otto elettroni. Questa tendenza del cloro a strappare un elettrone ad altri atomi, distruggendone magari le combinazioni pur di ottenerlo, lo rende uno dei piú potenti veleni. Il solfo ha due posti vacanti nel guscio esterno ed il suo comportamento dipende essenzialmente da questa sua condizione.

Viceversa il litio, il sodio ed il potassio hanno un gruppo, il piú esterno, in formazione, costituito da un solo elettrone. Questo elettrone è molto debolmente legato e, se si avvicina un atomo di cloro in cerca d'un elettrone, cambia subito di proprietario. Il risultato dello scambio è che ora i gruppi esterni dei rispettivi atomi sono completi: il cloro somiglia esternamente all'argon, ed il sodio (se questo è l'altro atomo) al neon. Ambedue gli atomi sono ora carichi d'elettricità: il cloro è negativo poiché possiede un elettrone in eccesso sul numero che gli è proprio, mentre l'atomo di sodio è positivo perché gliene manca uno per bilanciare la carica positiva del suo nucleo. Di conseguenza i due atomi s'attirano ed insieme formano una molecola di sale da cucina (cloruro sodico).

Il sodio è un metallo molle e bianco. Come ve-

dremo piú avanti, la caratteristica che distingue i metalli è il possesso di uno o due elettroni facilmente staccabili dai loro atomi. Nel processo or ora descritto il bianco metallo ed il velenoso gas si sono accoppiati formando un sale cristallino e trasparente. Il cambiamento di proprietà è profondo, ma non dobbiamo meravigliarcene: basta pensare che la disposizione degli elettroni alla periferia della molecola dev'essere completamente diversa da quella di ciascuno dei due atomi prima della loro combinazione, e che le proprietà di un atomo o di una molecola dipendono da tale disposizione.

Gli esempi di questo genere di combinazioni sono innumerevoli. Consideriamone ancora uno, un po' piú complicato: quello chiamato fluoruro di calcio, che come cristallo è conosciuto col nome di fluorite. Qui due atomi di fluoro, ciascuno dei quali abbisogna d'un elettrone (vedasi la tabella piú sopra) si sono alleati per attaccare un atomo di calcio che ha due elettroni nel suo gruppo piú esterno; ciascun atomo di fluoro attira uno di questi elettroni nel proprio sistema; perciò la molecola di fluoruro di calcio contiene tre atomi. Nell'allumina (ossido d'alluminio) che in natura forma i cristalli di rubino o zaffiro, abbiamo due atomi d'alluminio, ciascuno dei quali è stato costretto a cedere i tre elettroni del suo guscio esterno a beneficio di tre

atomi d'ossigeno, ciascuno dei quali ne ha preso due.

Oltre a questo sistema del prendere e del dare, gli atomi ne conoscono anche un secondo mediante il quale cercano di completare il loro guscio elettronico esterno: quello di ripartirsi fraternamente degli elettroni, con che ciascun atomo può contare gli elettroni comuni come appartenenti alla sua propria struttura, proprio nella stessa guisa di due case che hanno lo stesso muro divisorio. L'atomo d'idrogeno ha un solo elettrone; se due di essi si combinano, ciascuno porta in società il proprio elettrone; epperciò hanno insieme due elettroni, ed il risultato è una molecola d'idrogeno. Due atomi d'ossigeno combinati fra loro formano una molecola d'ossigeno, nella quale ciascun atomo d'ossigeno è circondato da otto elettroni, di cui quattro sono comuni ai due atomi. Nel diamante, come vedremo piú avanti, ogni atomo di carbonio è circondato da altri quattro, con ciascuno dei quali condivide due elettroni. Cosí ciascun atomo di carbonio è provvisto di un guscio esterno di otto elettroni, nessuno dei quali gli appartiene interamente. Combinazioni di questo genere sono generalmente molto solide e le molecole formate in tal modo assai stabili. Inoltre simili molecole sono, per cosí dire, contente della loro propria compagnia e sono poco inclini ad associarsi con altre; esse tendono a formare dei gas. Cionondimeno i gas piú stabili

sono in sostanza quelli che per loro natura possiedono il guscio esterno piú completo: elio, neon, argon e gli altri. Essi mostrano al massimo le proprietà caratteristiche dei gas, quali abbiamo conosciute come risultato della ritrosia ad associarsi e del perpetuo moto degli atomi che li compongono.

Capitolo Terzo

LA NATURA DEI LIQUIDI

La differenza fra un gas ed un liquido è che in un gas gli atomi e le molecole si muovono indipendentemente gli uni dagli altri, mentre in un liquido sono sempre in contatto tra loro, benché cambino continuamente i compagni. Nella contesa fra il moto e le forze d'attrazione il primo non ha piú la prevalenza: le forze attrattive possiedono ora un potere sufficiente a mantenere riunita la massa delle molecole come corpo continuo o almeno tante di esse da formare un volume definito e visibile di liquido. Tuttavia la supremazia delle forze attrattive non è assoluta: ha continuamente luogo un fenomeno che si chiama evaporazione. Supponiamo che in una camera vuota si trovi un secchio d'acqua. Le molecole di questa sono tutte in moto: esse vibrano, girano, cambiano di posto e di compagni ad ogni momento. Ma la loro animazione non è sufficiente per staccarle completamente le une dalle altre, salvo quando arrivano alla superfice dell'acqua ove delle condizioni affatto particolari esercitano la loro influenza. Di conseguenza le molecole si raggruppano a formare un corpo di volume definito, avente cioè dei limiti. Solo alla superfice avvengono delle fughe: data la continua agitazione

delle molecole può avvenire che una di quelle piú vicine alla superfice riceva un impulso grande abbastanza per rompere la sua coesione con le molecole sottostanti. Una simile molecola riesce finalmente a fuggire fuori della superfice del liquido. Se qualcosa di simile fosse successo a molecole all'interno del liquido, sarebbero di nuovo state catturate. Cosí il locale nel quale è stato posto il secchio d'acqua conterrà un numero gradualmente crescente di molecole d'acqua aggirantisi nell'aria con la stessa indipendenza delle molecole di un gas. Se il locale è chiuso, l'evaporazione non continua indefinitamente perché ad un dato momento la quantità di molecole d'acqua vaganti per il locale sarà tanto grande, che il numero delle molecole urtanti la superfice dell'acqua e rientrantivi eguaglierà quello delle molecole che ne escono; diciamo allora che lo spazio del locale è diventato saturo di vapor acqueo. Ciò può verificarsi prima che il secchio sia vuoto; ma se l'aria nel locale si rinnova continuamente, asportando del vapore acqueo, evaporerà col tempo tutta l'acqua contenuta nel secchio.

Le molecole che abbandonano la superfice dell'acqua saranno sempre quelle che possiedono una energia superiore a quella media, parte della quale esse spendono per svincolarsi dalle loro compagne; l'energia media della massa d'acqua nel secchio deve perciò diminuire costantemente man mano

che procede l'evaporazione. In altre parole: l'acqua del secchio diventa sempre piú fredda. Conosciamo tutti assai bene questo fenomeno. Se sventoliamo le mani mentre sono bagnate, sentiamo freddo; applichiamo, esagerandolo un poco, lo stesso metodo usato dalla natura per raffreddare il nostro corpo alla giusta temperatura. Il freddo che sentiamo sventolando le mani è un incentivo per il nostro corpo di reintegrare l'eccesso d'energia che le molecole sfuggenti hanno loro sottratto. Possiamo aumentare l'effetto refrigerante ricorrendo ad un liquido che evapori piú rapidamente dell'acqua; cosí per esempio i chirurghi usavano una volta spruzzare dell'etere su una determinata parte del corpo umano per provocare un congelamento locale. In contrade molto calde e secche si raffredda l'acqua da bere mantenendola in un sacco di tela da vela porosa, sospeso all'ombra, ma esposto al vento, e quanto piú questo è asciutto e caldo, tanto maggiore l'effetto. Nelle calde estati australiane è comune vedere questi sacchi appesi sotto la veranda della casa oppure sotto il tetto di piccole stazioni ferroviarie di campagna. L'acqua trapela attraverso la tela ed evapora rapidamente nella corrente d'aria, mentre quella rimasta nel sacco si raffredda.

Ripeteremo ora l'esperienza in modo assai appariscente. I due bulbi visibili in fig. 13 contengono solo acqua e niente aria. Portiamo dapprima tutta

l'acqua nel bulbo superiore ed immergiamo l'inferiore in aria liquida; in due o tre minuti l'acqua del bulbo superiore congela benché mantenuta lontana dall'aria liquida. La spiegazione è questa: le molecole che sfuggono dalla superfice dell'acqua contenuta nel bulbo superiore, seguono il tubo e giungono al bulbo inferiore. Ciò avverrebbe anche se quest'ultimo non fosse immerso nell'aria liquida; ma allora le molecole od almeno la maggior parte di esse tornerebbe indietro cedendo di nuovo all'acqua l'eccesso d'energia di cui erano dotate, sí che l'acqua verrebbe assai poco raffreddata. Se invece si raffredda il bulbo inferiore mediante aria liquida, le molecole non tornano indietro, poiché hanno persa la loro energia di moto, ed allora si

FIG. 13. Il crioforo.
Il bulbo inferiore, che è vuoto, si trova immerso in aria liquida. Il bulbo superiore contiene acqua che rapidamente congela.

radunano prima come acqua, poi come ghiaccio nel bulbo inferiore. L'acqua nel bulbo superiore si raffredda in conseguenza e ben tosto congela. Si è levata l'aria dai bulbi solo per la necessità di lasciar via libera alle molecole d'acqua ed accelerare in tal modo il processo d'evaporazione. Se questo avvenisse troppo lentamente, l'aria ambiente cederebbe al bulbo superiore tanto calore da impedire la congelazione dell'acqua. La presenza dell'aria non impedisce alle molecole piú ricche d'energia d'abbandonare la superfice dell'acqua, ma ne imbarazza i successivi movimenti, riducendo il processo di diffusione di cui abbiamo già parlato.

Quando in seguito ad un aumento di temperatura un liquido si mette a bollire, le molecole evaporanti sono tante ed hanno tale energia di moto, da sollevare l'aria dalla superfice del liquido e respingerla « in massa » come se fosse un coperchio. Le singole molecole non hanno piú da aprirsi un varco nella folla delle molecole d'aria. L'intero processo dell'ebollizione è in apparenza cosí differente da quello dell'evaporazione, che la somiglianza essenziale tra i due processi sfugge facilmente. La temperatura alla quale il liquido bolle dipende dalla pressione che le molecole sfuggenti dal liquido debbono vincere; alla cima del Monte Bianco l'acqua bolle ad una temperatura che è di 15 gradi centigradi inferiore a quella d'ebollizione alla sua base.

Il calore necessario per vaporizzare un liquido dà una misura dell'energia necessaria per separare una molecola dall'altra. Forse dicendo cosí non si fa risaltare tutta l'importanza di queste forze che, piccolissime per la singola molecola, sono invece cosí grandiose nel loro complesso. Pensiamo tuttavia al calore necessario per trasformare l'acqua in vapore ed all'entità di lavoro che il vapore può fare. Le suddette forze si manifestano piú direttamente in ogni goccia sospesa d'acqua o d'altro liquido. Le molecole vi si attaccano l'una all'altra come un grappolo di api. I vincoli con i quali le molecole dello strato superiore aderiscono alla superfice dalla quale la goccia pende debbono sopportare l'intero peso della goccia. Anche qui la grandezza e l'importanza delle forze in gioco vengono messe chiaramente in luce da questo semplice effetto; ma l'esperienza può venir sviluppata in forma piú appariscente. Prendiamo un tubo di vetro piegato contenente dell'acqua, ma non dell'aria (fig. 14). Incliniamolo in modo che tutta l'acqua si rifugi in uno dei rami del tubo; se per caso dovesse ancora trovarsi in questo ramo una piccolissima bolla d'aria, la si fa passare nell'altro ramo tenendo il tubo in posizione conveniente e battendo con esso leggermente sul tavolo. Raggiunto questo risultato il tubo può venir tenuto in modo che il livello dell'estremità libera della colonna d'acqua si

trovi molto al di sotto del livello dell'altra, aderente all'estremo del tubo di vetro. Il sovrappiú di peso della colonna di sinistra (fig. 14) rispetto a quella piú corta di destra è sostenuto dall'aderenza delle molecole d'acqua al tubo di vetro e dalla coesione delle molecole tra loro. In realtà abbiamo dinanzi a noi una goccia d'acqua lunga circa 30 centimetri. Una goccia cosí lunga non è possibile tenerla sospesa ad un dito, poiché la colonnina d'acqua cambiando di forma si spezza. Mediante il tubo impediamo questo fatto eppercíò possiamo rendere piú evidente la grandezza delle forze molecolari.

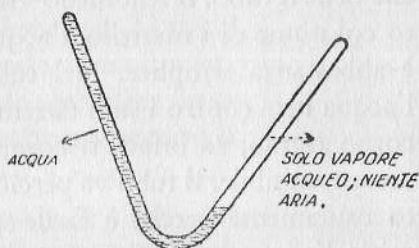



FIG. 14.

Quando tentiamo di allungare una sbarra di ferro, abbiamo una percezione diretta della grandezza delle forze di coesione delle molecole del ferro allo stato solido, poiché lo sforzo che dobbiamo applicare è grande; molti potrebbero essere indotti a ritenere che una massa d'acqua sia invece facile d'allungare, ma non è cosí. È facile cambiare la forma dell'acqua, ma non di staccare l'uno dall'altro due strati di molecole d'acqua direttamente a contatto

tra loro. L'acqua è altrettanto difficile a dilatarsi che a comprimersi.

Faremo ora una piccola digressione, poiché ci imbattiamo in un effetto curioso. Se incliniamo il nostro tubo in modo che l'acqua scorra rapidamente lungo di esso verso uno dei suoi estremi, si sente il rumore di un colpo, come se collidessero insieme due corpi duri; il colpo è anche sentito dalla mano che tiene il tubo. Il fenomeno viene sovente descritto col nome di « martello d'acqua »; la spiegazione è abbastanza semplice. Nel tubo non c'è aria e l'acqua urta contro i suoi estremi come se fosse un corpo rigido; ed infatti si comporta cosí perché è incompressibile. Il tubo va perciò maneggiato molto cautamente perché è facile sfondarne un'estremità: l'acqua agisce come un martello contro il fondo del tubo.

Un esempio molto curioso e, quando si verifica, molto serio di questo fenomeno si è presentato in questi ultimi tempi e consiste nel logorío delle eliche delle navi quando girano molto rapidamente. La fig. A in tavola IX mostra l'erosione di una pala d'elica del *Mauretania*. Il fenomeno si verificò per la prima volta dopo l'adozione delle turbine a vapore del Parsons, che resero possibile un maggior numero di giri al minuto delle eliche navali epperciò una maggior velocità dei bastimenti; esso fu sulle prime causa di grosse perdite sia finanziarie

che d'altro genere. Si trovò la spiegazione del fenomeno allorché si poté stabilire che, per la rapidità di marcia delle navi e l'alto numero di giri delle eliche, l'acqua non arrivava in tempo a riempire completamente la cavità che le pale lasciavano dietro di sé. La fig. B della tavola IX mostra queste cavità, quali si formavano in prove su modelli eseguite dalle "Turbinia Works" in Newcastle. Si tratta di vuoti, non di bolle d'aria, lasciati indietro dal bordo dell'elica; sulla figura si può agevolmente seguire la spirale appartenente a ciascuna pala d'elica.

FIG. 15. Martello idraulico di Parsons

Ora queste cavità si riempiono di nuovo completamente sotto la pressione dell'acqua circostante e, siccome sono prive d'aria, le pareti dei vani battono insieme con un colpo duro e secco, cosí come faceva l'acqua contro il fondo del nostro tubo. Se una particella di pala d'elica forma una delle pareti della cavità, il colpo può essere cosí violento da strappare un pezzetto di metallo. Molto lavoro ha richiesto il trovare la giusta spiegazione del fenomeno e l'escogitarne i rimedi: oggi le pale delle eliche si fanno in una lega speciale resistente alle

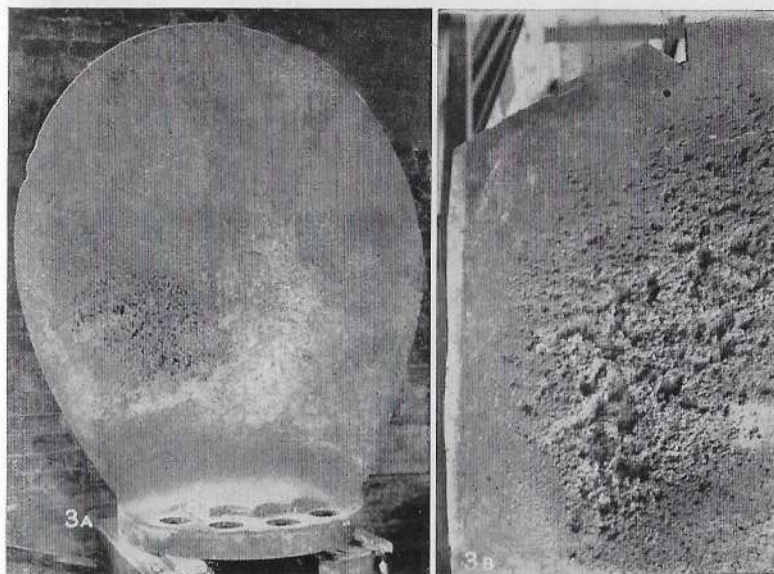
erosioni e si dà loro una forma piú perfezionata.

Un'esperienza assai istruttiva che venne fatta nel corso di queste ricerche è illustrata in fig. 15. Il robusto cilindro metallico che si vede al centro della figura è ripieno d'acqua; lo si lascia cadere entro un recipiente pure pieno d'acqua; quando il cilindro urta contro il fondo, la forza d'inerzia dell'acqua nel cono, coadiuvata da quella del grosso peso W, è sufficiente a far proseguire la corsa dell'acqua (che allora esce dal foro in basso a sinistra) ed a lasciare una cavità al vertice del cono in V. Sotto la pressione dell'acqua circostante, questa cavità si riempie subito di nuovo con l'acqua che si trova nel cilindro e siccome, salendo, quest'acqua trova una sezione di cono sempre minore, essa aumenta di velocità ed arriva contro la laminetta di ottone P, che chiude in alto il cono, con una forza viva tale da perforarla nettamente.

L'acqua riempie le cavità dietro le pale delle eliche delle navi con un rumore tale che la presenza di una nave può venire percepita a grande distanza, mediante ricevitori acustici sottomarini.

Molti dei nostri lettori avranno provato a proprie spese, sebbene in modo meno pericoloso, quale colpo può dare una massa d'acqua in causa della sua pochissima compressibilità: qualche volta sarà loro infatti accaduto di saltare nell'acqua da una certa altezza, prendendo una posizione sbagliata:

TAVOLA IX.

A

La figura di destra mostra una regione fortemente erosa di una pala delle prime eliche del « Mauretania ». Si osservino nella figura di sinistra i piccoli intagli al bordo della pala.

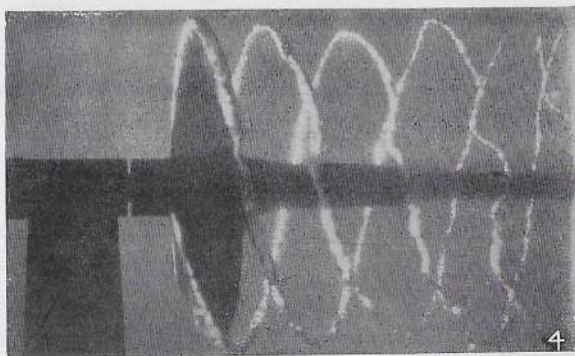
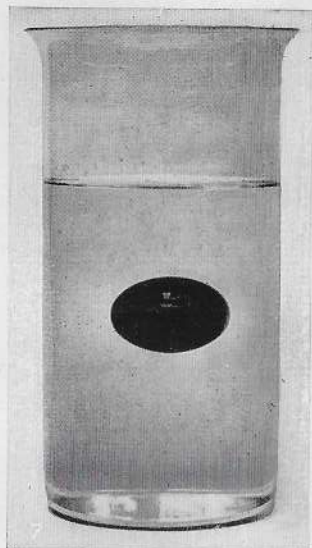
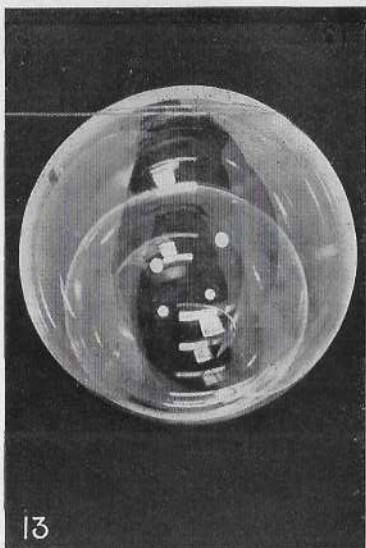
B

Fotografia delle cavità prodotte da un'elica in rotazione. Bacino di prova della « Parsons Marine Steam Turbine Co. » L'elica si vede a sinistra, a forma di disco; le pale sono tre e ciascuna genera nell'acqua una serie di piccole cavità disposte a spirale; si vede nettamente l'inizio dell'elica, di ciascuna di queste spirali.

A B

FIG. A. Una grossa goccia di orto-toluidina è sospesa nell'acqua su uno strato di salamoia.
FIG. B. Due bolle di sapone una nell'altra; come in fig. 21 e per la stessa ragione, non fondono insieme.

il colpo che si prende contro la superfice dell'acqua non è piacevole.

Siccome le molecole di un liquido, sotto l'influenza delle loro scambievoli attrazioni, tendono quanto piú possono ad avvicinarsi tra loro, cosí, se si lascia loro la libertà di farlo, si riuniscono sotto forma di sfera; questa tendenza è molto manifesta col mercurio quando se ne lascia cadere un poco sopra un tavolo: tosto esso si divide in tante gocce tonde che corrono all'ingiro come se fossero delle

FIG. 16. Gocce di mercurio su un tavolo. Quelle piccole sono quasi perfettamente sferiche; le grandi sono appiattite.

sferette solide. Anche l'acqua si comporta nello stesso modo quando non bagna la tavola; generalmente però essa bagna il corpo solido col quale viene a contatto, ma vi sono molte eccezioni: per esempio quando se ne lascia gocciolare un po' su una superfice impolverata.

Dobbiamo ancora considerare ciò che veramente significa ed implica il « bagnare », poiché costituisce una parte importante del nostro tema. Anche la gravitazione disturba la tendenza dei liquidi a raccogliersi sotto forma sferica: quando le gocce di mercurio sono molto piccole appaiono perfetta-

mente sferiche, mentre gocce piú grandi rassomigliano dippiú a grossi dischi con spigoli arrotondati. Se desideriamo far assumere ad un liquido una forma perfettamente sferica dobbiamo cercare di annullare l'influenza della gravità e della bagnatura. Le piccole gocce di mercurio costituiscono un felice esempio di sfericità. Un altro è fornito dai pallini da caccia: il piombo fuso, fatto piovere dall'alto, si raccoglie in gocce sferiche, proprio come fa la pioggia.

Sembrerebbe che qui esistesse una contraddizione con quanto detto prima: la gravitazione non è stata eliminata ed è al contrario in piena azione; cionondimeno si formano delle gocce sferiche. Ma la gravitazione agisce solo indirettamente; è la resistenza alla gravità che disturba la formazione delle sfere. Nel caso delle grosse gocce di mercurio, l'appiattimento non è dovuto direttamente alla forza di gravità bensí alla pressione della tavola verso l'alto e che si oppone alla gravitazione. Quando le gocce di piombo arrivano in basso cadono in acqua e conservano la forma sferica da loro acquisita.

Faremo ora un esperimento per illustrare la nostra questione. L'orto-toluidina è un liquido scuro che non si lascia mescolare con l'acqua o, in altre parole, che non viene «bagnato» dall'acqua; la sua densità è tale da restare facilmente in sospensione in uno strato d'acqua pura che galleggi su uno stra-

to di acqua salata (fig. A di tavola X). La sfera che si forma viene sostenuta da ogni lato dall'acqua, e non solo in un punto come nel caso di una goccia di mercurio supposta perfettamente sferica e sostenuta da un tavolo. Sulle condizioni nelle quali sperimentiamo non hanno influenza né la gravità né la bagnatura, epperciò si forma una grossa goccia sferica, di circa 5 centimetri di diametro, come in figura. Se disturbiamo la goccia con un bastoncino di vetro, essa riprende pigramente la sua forma primitiva; oppure, dopo essere passata lentamente attraverso varie forme, si spezza in sfere piú piccole. Se col bastoncino di vetro premiamo leggermente contro la goccia, si forma alla superfice di questa una depressione o fossetta; la tendenza dell'orto-toluidina di formare una goccia sferica è per il momento ostacolata; ma essa cerca di adattarsi alle circostanze nel miglior modo possibile. Una fossetta analoga si forma alla superfice del mercurio sul quale galleggi un corpo solido, per esempio una palla di ferro; la fig. 17 mostra la forma che la superfice assume in vicinanza della palla. Se osserviamo la superfice del mercurio presso le pareti del recipiente, possiamo vedere che assume lo stesso profilo.

FIG. 17. Una palla di ferro che galleggia sul mercurio.

Ben diversamente stanno le cose quando il liquido bagna le pareti del recipiente che lo contiene oppure la superfice del corpo che galleggia su di esso.

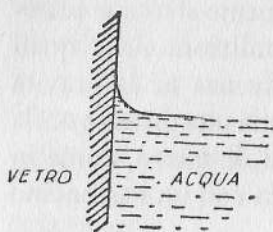



Fig. 18. L'acqua si eleva lungo le pareti d'un recipiente ch'essa bagna.

Se si versa dell'acqua pura in un vaso di vetro pulito, vediamo ai bordi l'acqua elevarsi lungo le pareti. Questo fenomeno è un po' piú complicato dell'altro; evidentemente esistono delle forze attrattive fra il vetro e l'acqua.

Se immergiamo una lastra di vetro nel mercurio contenuto in una bacinella a fondo piatto (fig. 19) e la premiamo contro questo fondo in modo che non rimanga del mercurio fra di essa ed il fondo della bacinella, la lastra di vetro rimarrà aderente al fondo benché sia piú leggera del mercurio, ed occorrerà anzi una certa forza per staccarnela. La spiegazione è semplice ed in accordo con i principii che abbiamo esposto. La lastra può sollevarsi solo se del mercurio si insinua sotto di essa; altrimenti la lastra non può sollevarsi che di pochissimo, poiché al di sotto di essa si formerebbe il vuoto, oppure (dato

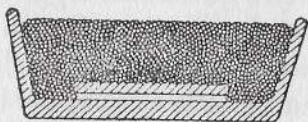
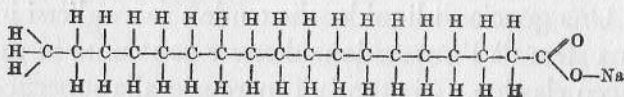



FIG. 19. Una lastra di vetro sul fondo di una bacinella piena di mercurio. La lastra è stata disegnata un pò' sollevata dal fondo per illustrare la riluttanza del mercurio a riempire il vuoto cosí formato.

che un po' d'aria sia rimasta aderente alla lastra) uno spazio in cui la rarefazione dell'aria crescerebbe rapidamente. Siccome la pressione sopra la lastra è maggiore di quella dell'atmosfera, le forze dirette dall'alto al basso sulla lastra sono piú grandi di quelle che tendono a sollevarla. Il profilo che assume il mercurio presso i bordi della lastra è visibile in fig. 19: il mercurio si rifiuta di ridursi a sottile lamina per potersi insinuare nello stretto spazio sotto la lastra.

Una goccia di liquido che tende a raccogliersi in una sfera dà l'impressione d'essere contenuta in un sacco elastico. Gli atomi di mercurio alla superfice della goccia non si trovano esattamente nelle stesse condizioni di quelli nell'interno, perché sono liberi su uno dei loro lati ed è solo in questo senso che possiamo parlare di una pellicola o membrana superficiale. Tuttavia ricorriamo all'immagine di questa membrana, trovandola conveniente ai nostri scopi; cosí parliamo della sua tendenza a contrarsi e della sua tensione. Talora però si incontra una pellicola superficiale la cui composizione è differente da quella del liquido all'interno, ed allora si manifestano molti strani ed interessanti fenomeni. L'esempio che ci è piú familiare è certamente quello della bolla di sapone. Mettiamo nell'acqua un po' di sapone e tosto possiamo, sbattendola, cavarne una montagna di schiuma oppure soffiarla in bolle. Come mai

il sapone ha potuto produrre questo effetto? In virtú delle proprietà della molecola di sapone. Questa ha una forma curiosa, assai piú lunga che larga; ed è fatta di una catena d'atomi di carbonio frangiata per tutta la sua lunghezza con atomi di idrogeno e terminante ad un estremo con un piccolo fascio di tre atomi d'idrogeno, dall'altro con un piccolo gruppo di atomi d'ossigeno e di sodio. Il primo di questi due fascetti (quello CH_3 di sinistra in figura)

```
      H H H H H H H H H H H H H H H
H\    | | | | | | | | | | | | | | |    O
H—C—C—C—C—C—C—C—C—C—C—C—C—C—C—C—C—C<
H/    | | | | | | | | | | | | | | |    O—Na
      H H H H H H H H H H H H H H H
```

è assai riservato: non si sente attratto verso un legame con altri atomi o molecole. Il secondo invece (di destra in figura, gruppo CO_2Na) non è per nulla cosí scontroso: è un gruppo attivo che volentieri s'associa con altri ed ha specialmente una forte tendenza di combinarsi con molecole d'acqua; per la qual ragione il sapone si scioglie nell'acqua. Siccome però un solo estremo della catena è assai attivo a questo riguardo — mentre l'altro estremo ed i fianchi della catena si comportano diversamente — le molecole di sapone si soffermano volentieri alla superfice esterna dell'acqua quando per caso vi giungono nel corso delle loro migrazioni. Si forma cosí sull'acqua una vera pellicola superficiale costi-

tuita da molecole di sapone, che, per cosí dire, stanno in piedi: con un estremo radicato nell'acqua e l'altro esposto all'aria. Esse si dispongono fianco a fianco come i culmi in un campo di grano oppure i peli d'un velluto. Non sono tuttavia cosí libere come questi peli, bensí legate tra loro da una certa forza d'attrazione, che si esplica quando si trovano cosí disposte fianco a fianco. Vedremo piú avanti come questa forza dà prova di sé in altre circostanze. Le molecole di sapone formano cosí una specie di sacco pellicolare alla superfice dell'acqua, un vero inviluppo. La pellicola può venire distesa nel senso che altre molecole di sapone escono fuori dall'interno del liquido per insinuarsi fra quelle della superfice.

La bolla di sapone è un sottile guscio sferico di soluzione d'acqua saponata rivestito internamente ed esternamente dalla pellicola di sapone; questo rivestimento dà alla bolla la sua stabilità. Essa si contrae se si dà modo all'aria interna di sfuggire: evidentemente le lunghe molecole di sapone tendono a riunirsi con le molecole d'acqua quanto piú strettamente possibile. Ma una superfice esterna rimane pur sempre e,dove i due tipi di molecole sono entrambi presenti, sono quelle lunghe di sapone che formano lo strato piú esterno. Un'esperienza molto semplice mostrerà ancor piú netta questa tendenza a contrarsi della bolla di sapone. Immergiamo un a-

nello di filo di ferro nell'acqua saponata; estraendolo, lo troviamo coperto da una pellicola di sapone. Nella pellicola fluttua un cappio di refe che era stato attaccato al cerchio di filo di ferro prima di tuffare questo nell'acqua saponata. Se facciamo ora saltare la membrana entro il cappio di refe, toccandola con un ago riscaldato, il cappio assume istantaneamente la forma di un cerchio perfetto come è mostrato in fig. 20. È chiaro che l'intera pellicola è sotto tensione e che tende a contrarsi.

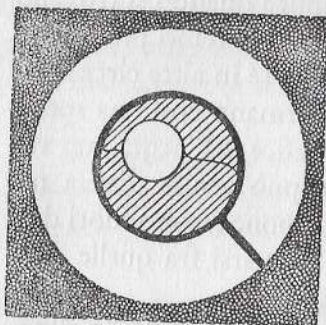



FIG. 20. Un cappio di refe fine fluttua nella sottile lamina di acqua saponata; con un ago arroventato si distrugge la pellicola entro il cappio. Subito questo assume la forma di un cerchio perfetto (secondo C. V. Boys).

Una particolarità molto curiosa delle bolle di sapone è la loro riluttanza a fondersi insieme. Soffiamo una bolla deponendola su di un anello (fig. 21); con un'altra bolla urtiamo contro la prima usando una forza che diremmo sufficiente a romperla. Invece le due bolle si respingono l'una l'altra come se fossero delle palle di gomma. Forse la spiegazione risiede nel fatto che lo strato superficiale d'ambedue le bolle è costituito da quelle molecole di sapone che, come abbiamo visto piú sopra, sono poco inclini ad associarsi con altre molecole

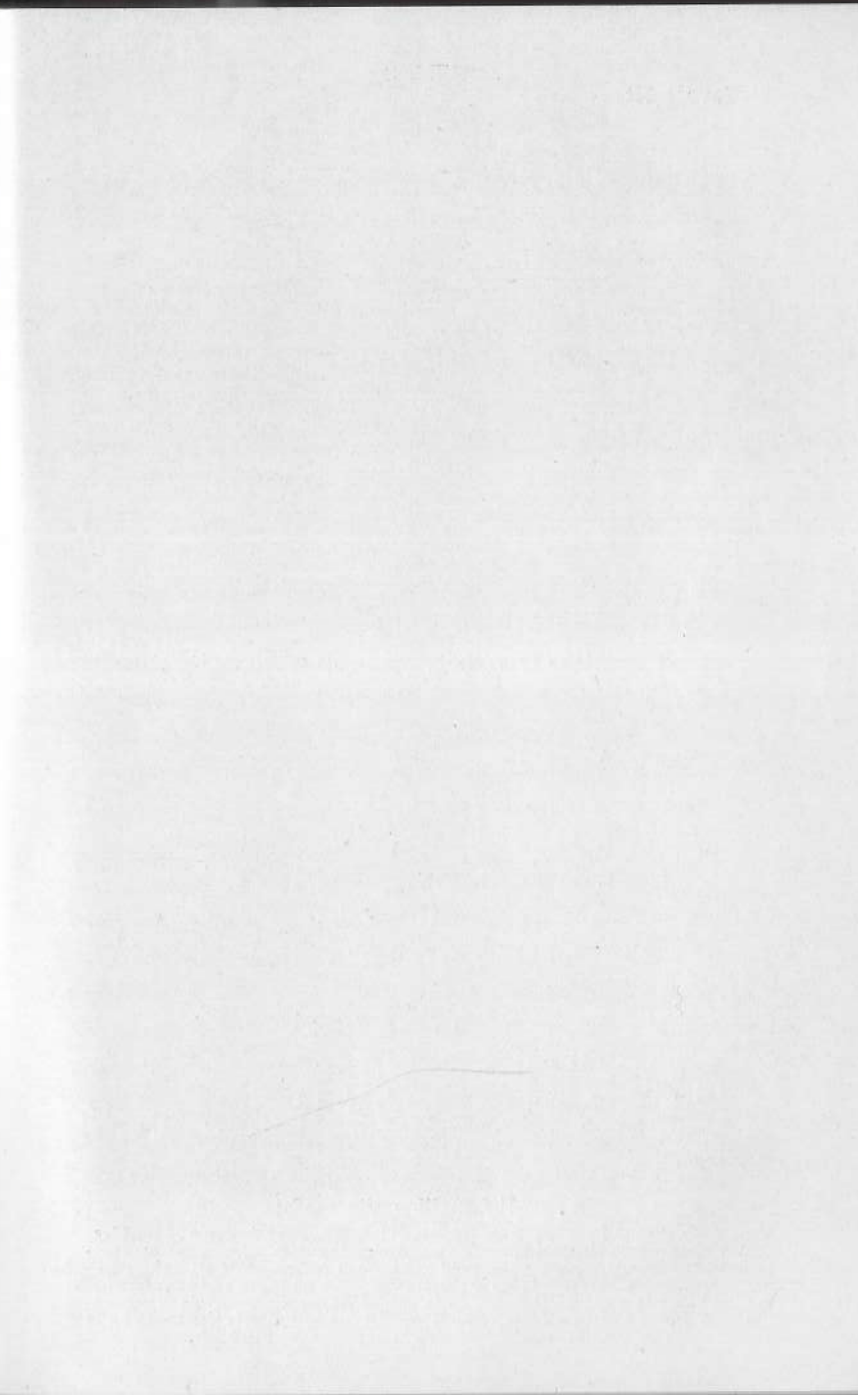



TAVOLA XI.

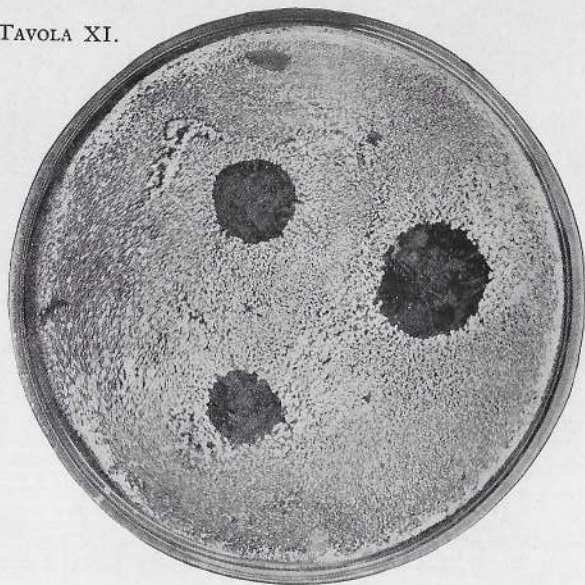



FIG. A. Piccole gocce d'olio, sparse sulla superficie impolverata dell'acqua, si estendono in macchie circolari.

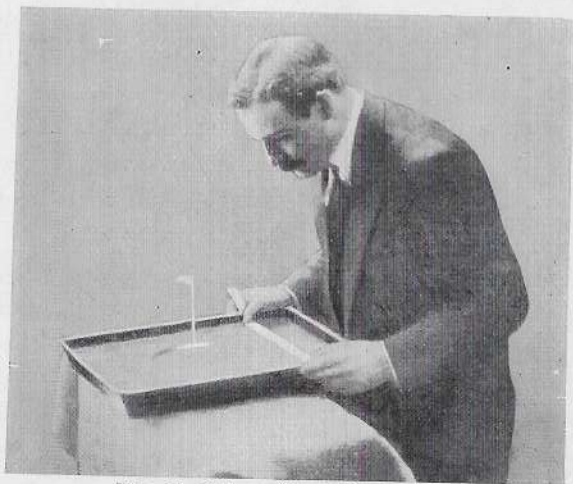



FIG. B. Il battellino alla canfora.

Un piccolo pezzo di canfora viene fissato alla poppa di una minuscola ed assai leggera navicella. Sciogliendosi la canfora nell'acqua, la sua soluzione forma una pellicola superficiale la quale s'estende all'indietro con tanta energia da spingere in avanti la navicella. Una traccia d'olio portata sull'acqua ne copre rapidamente tutta la superficie e la navicella si ferma. Se il velo d'olio copre l'acqua solo in parte, la navicella s'arresta appena l'operatore spinge di tanto in avanti la riga che tiene in mano, da far raggiungere all'olio la poppa del battellino.

o parti di molecole. Le due bolle, benché premute l'una contro l'altra, non hanno tendenza a fondersi insieme, perché le parti di esse che vengono a contatto tra loro non si attirano a vicenda.

Fig. 21. La collisione fra due bolle di sapone (secondo C. V. Boys). Le due bolle sono premute l'una contro l'altra e si possono anche strofinare reciprocamente senza che si fondano insieme. Ciò perché vengono a contatto tra loro solo le estremità inattive delle molecole di sapone che formano lo strato superficiale delle due bolle.

C. V. Boys in un suo libretto sulle bolle di sapone e sulle forze che le modellano, descrive una bellissima esperienza che spiega ancor meglio queste cose. Una bolla di sapone viene soffiata su un anello fissato ad un sostegno (fig. 21 A). Un piccolo anello, che porta un leggero peso, viene attaccato alla parte inferiore della bolla, come è visibile in figura. Ora si introduce dall'alto nella bolla un cannello di vetro carico di soluzione di sapone e si soffia; si forma, all'interno della prima bolla, una seconda bolla e, quando questa ha raggiunta una sufficiente grandezza, la si stacca con abile movimento dal cannello. La bolla interna si posa allora delicatamente sulla

Fig. 21 A. Due bolle di sapone l'una nell'altra.

parte inferiore di quella esterna, toccandola secondo un cerchio, non nel punto piú basso. L'intenzione era precisamente questa ed ecco il perché del peso attaccato alla bolla esterna. Le due bolle non cercano affatto di fondersi, benché a contatto lungo una linea, senza dubbio perché si presentano l'una all'altra superfici costituite dalle estremità inattive, poco socievoli, delle molecole di sapone. Se la bolla esterna non fosse stata deformata dal piccolo peso attaccatovi, le due bolle si sarebbero toccate nel loro punto piú basso. Ora generalmente si raccoglie in tal punto della bolla interna una goccia di soluzione; quando questa goccia viene a contatto con la bolla esterna, le due bolle di solito si fondono insieme. La goccia di soluzione getta per cosí dire un ponte fra le due bolle. Se ora si spinge il cannello di vetro dal di sotto fino a toccare il punto piú basso della bolla interna e se ne aspira via la goccia di soluzione, si può levare il piccolo peso attaccato alla bolla esterna e le due bolle possono allora toccarsi nel loro punto piú basso senza scoppiare (Tavola X fig. B).

La schiuma che si forma sui liquidi è sovente causata dalla presenza di molecole che hanno la stessa proprietà di formare pellicole superficiali. La schiuma che si raccoglie sui piccoli corsi d'acqua è sovente dovuta a varie saponine, che si trovano in molte piante e le cui molecole hanno una forma allungata,

a guisa di catena. Cosí anche la schiuma lungo le spiagge marine è da ritenersi causata da molecole analoghe provenienti dalle erbe marine.

Gli ultimi tempi hanno portato molte nuove conoscenze sulla forma di queste lunghe molecole cateniformi. Dobbiamo questi progressi specialmente al defunto Lord Rayleigh, a Devaux in Francia, a Langmuir in America, a Hardy e ad Adam in Inghilterra, che si sono particolarmente occupati del comportamento degli olii quando si lasciano espandere alla superfice dell'acqua. Ripeteremo alcune delle loro esperienze al fine di procurarci un'idea dell'importanza degli effetti di cui stiamo parlando.

Procuriamoci anzitutto una superfice d'acqua pulita, che non sia cioè contaminata da tracce di sostanze grasse. Meglio è fissare un tubo di gomma al rubinetto dell'acqua ed appoggiare l'estremità libera del tubo sul fondo di un recipiente, in modo che l'acqua possa traboccare e trasportare con sé ogni impurità depositatasi alla sua superfice. Ora spargiamo sullo specchio d'acqua un sottile strato di finissimo talco od altra polvere conveniente. Indi immergiamo una fine punta di vetro od uno spillo in olio — per esempio d'oliva — e, dopo averne levato quasi tutto l'olio, tocchiamo con la punta, appena appena ingrassata, la superfice dell'acqua. Subito si forma un cerchio libero da polvere intorno alla punta (fig. A in tavola XI). Sembra che le lunghe

molecole cateniformi si dispongano affiancate sulla superfice, come precedentemente con le bolle di sapone; solo che in quest'ultimo caso provenivano dall'interno, ora dall'esterno. Ogni molecola s'affretta a radicarsi nell'acqua con la sua estremità attiva e sta ritta, come se fosse una pianta nata e cresciuta nell'acqua. Alla fine tutte le molecole hanno per cosí dire messo le radici costituendo un sottile velo, grosso quanto è lunga una molecola e coprente la superfice dell'acqua; lo spessore del velo è dell'ordine di due milionesimi di millimetro. Misurando il peso dell'olio sparso sull'acqua — assai difficile compito, data la piccolezza del peso — e l'area coperta dalla macchia d'olio, è possibile giungere alla determinazione dello spessore della pellicola oleosa. Questo fu il metodo seguito dai suddetti ricercatori; ma piú recentemente è stato possibile applicare un metodo nuovo, basato sull'uso dei raggi X, metodo che illustreremo piú innanzi e che dà risultati piú esatti. Ad ogni modo quelli ottenuti nelle prime ricerche permettevano già d'asserire che lo spessore dello straterello d'olio era quale bisognava attendersi qualora fosse eguale alla lunghezza di una molecola; quest'ipotesi era poi grandemente confortata da una importante constatazione: sostanze diverse, che per il loro comportamento chimico sono da considerarsi come molecole cateniformi di differente lunghezza, formano sull'acqua pellicole di va-

rio spessore, con che gli spessori stanno tra loro come, giusto quanto era da attendersi, le lunghezze delle rispettive molecole.

Quando la goccia d'olio adoperata è abbastanza piccola e la polvere finemente sparpagliata sull'acqua, la macchia d'unto è esattamente circolare. Se pungiamo la superfice dell'acqua in un altro punto, si forma un secondo cerchio. La formazione di ciascun cerchio non è affatto influenzata dalla presenza degli altri. Ciò venne considerato da Devaux come una prova che ogni singola goccia interessa soltanto quella parte di superfice sulla quale si allarga e non l'intera massa del liquido. Un simile comportamento è presumibile, visto che il velo d'olio continua ad estendersi solo fin quando il suo spessore ha raggiunto un certo valore minimo; dopo di che la macchia non si allarga piú oltre. Una goccia piú grossa occupa una superfice maggiore; poche gocce bastano per esempio a coprire lo specchio d'acqua di una grossa vasca da bagno. Quando il velo di polvere, che prima occupava tutta la superfice dell'acqua, vien : raggrumato in piccole isole in seguito a reiterata applicazione di piccole gocce d'olio in diversi punti della superfice, ma questa non è ancora completamente ricoperta dalla pellicola d'olio, si può comodamente osservare la rapidità con la quale l'olio si estende: basta toccare con la punta oliata dell'ago la superfice dell'acqua a qualche distanza

da una delle isolette galleggianti di polvere; questa viene rapidamente spinta lontano dalla macchia d'olio. Gli impulsi impartiti in questo modo sono la causa dei vivaci movimenti di frammenti di canfora gettati sull'acqua ; esperienza questa ben nota da lungo tempo. Quando la canfora si scioglie, la soluzione si espande rapidamente sulla superficie dell'acqua in una sottile lamina, sicché il frammento di canfora stesso rincula per reazione come un fucile quando parte il proiettile oppure un razzo quando espelle posteriormente i gas combusti. Talora le particelle di canfora si precipitano in tutti i sensi, talora invece girano allegramente su se stesse. Si può far vagare sull'acqua una minuscola nave fissando un pezzetto di canfora alla sua poppa in modo che appena tocchi l'acqua (fig. B in tavola XI). Fa un curioso effetto vedere come una flotta di simili navi lillipuziane si ferma improvvisamente in piena marcia appena viene portata sull'acqua una goccia d'olio. Questa si espande istantaneamente su tutta la superfice dell'acqua impedendo la dissoluzione della canfora.

Tutti avranno sentito dire che le onde del mare s'acquetano appena si versa dell'olio sulla superfice del mare. Possiamo studiare questo fenomeno ricorrendo al lungo serbatoio della fig. A in tav. XII, usato da Rayleigh allo stesso scopo; un ventilatore elettrico serve a produrre il vento che fa increspare

la superfice dell'acqua al pari di una burrasca. Le onde scompaiono d'incanto appena si lasciano cadere al centro della burrasca alcune gocce d'olio; dopo pochi istanti il velo d'olio viene soffiato contro l'altra estremità del serbatoio e le onde si gonfiano di nuovo. Possiamo ripetere l'esperimento quante volte lo desideriamo. Bisogna ammettere che il vento non ha presa sull'acqua; questa, come sappiamo, è ricoperta da un velo d'olio, la cui faccia superiore consta delle estremità inattive delle molecole cateniformi d'olio e può darsi che le molecole d'aria, quando colpiscono questo strato di molecole, ne rimbalzino come da una superfice levigata. Una superfice ruvida verrebbe spinta in avanti dagli urti delle molecole d'aria, ove intendiamo con « ruvido » che gli intervalli fra le molecole colpite sieno dello stesso ordine di grandezza delle molecole incidenti. Ma quando la superfice della pellicola oleosa è molto liscia ed ha poca tendenza d'inceppare il moto delle molecole d'aria che la colpiscono, l'aria non riesce a trascinarla con sé ed a gonfiarla in quelle piccole onde che in mare crescono fino a diventare enormi cavalloni. Cosí l'olio calma le onde arrestando l'azione del vento ed il moto ondoso si estingue in virtú dell'attrito proprio dell'acqua.

Attaccheremo ora il problema del « bagnamento » di una superfice. Sappiamo per esempio che la superfice pulita di un vetro viene bagnata dall'acqua,

ma non quando è imbrattata d'unto, sia pure d'un velo appena visibile. Le molecole d'acqua si rifiutano evidentemente di associarsi con le molecole di grasso. Ciò non recherà forse meraviglia poiché abbiamo visto che almeno in certi casi le lunghe molecole costituenti olii e grassi rivolgono verso l'esterno la loro estremità inattiva, che ha poca simpatia per le molecole d'acqua. Cosí se versiamo dell'acqua su una superfice untuosa, essa si raccoglie in gocce, come del mercurio lasciato cadere su un tavolo; la forma delle gocce dipende dall'attrazione reciproca delle molecole d'acqua. Un ago oliato, deposto delicatamente sull'acqua, non va a fondo, bensí produce solo una leggera depressione della superfice liquida; sembrerebbe che l'acqua possieda una sottile pellicola superficiale che ceda leggermente sotto il peso. Ancor piú sorprendente è il vedere galleggiare sull'acqua uno staccio metallico cosparso di grasso (fig. 22). Lo staccio viene immerso in paraffina liquida poi scosso per liberare le maglie dalla paraffina, indi messo ad asciugare; meglio non toccarlo con le dita. Esso galleggia senz'altro por-

FIG. 22. Uno staccio ricoperto di grasso (secondo C. V. Boys).

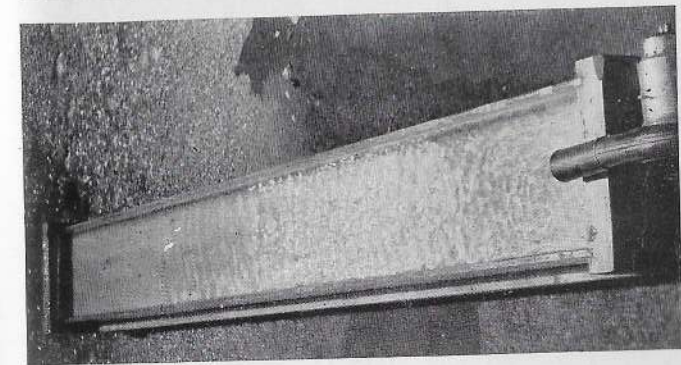



FIG. A. Acqua in burrasca.

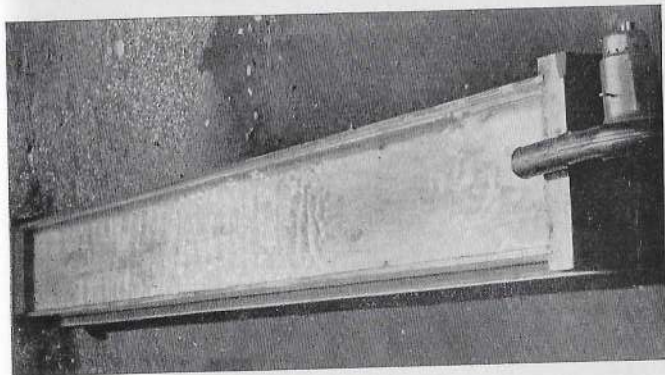



FIG. B. L'olio calma le onde.

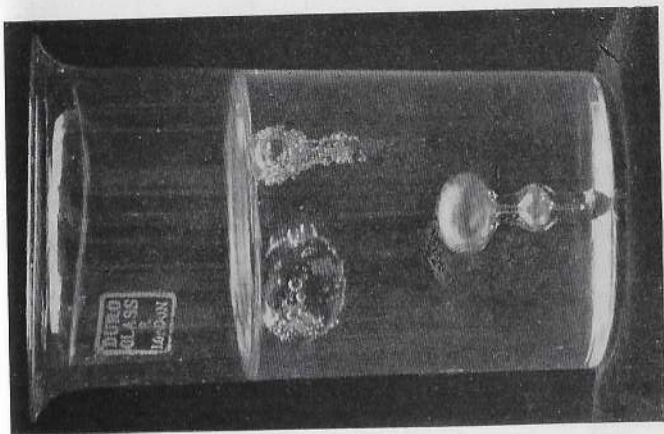
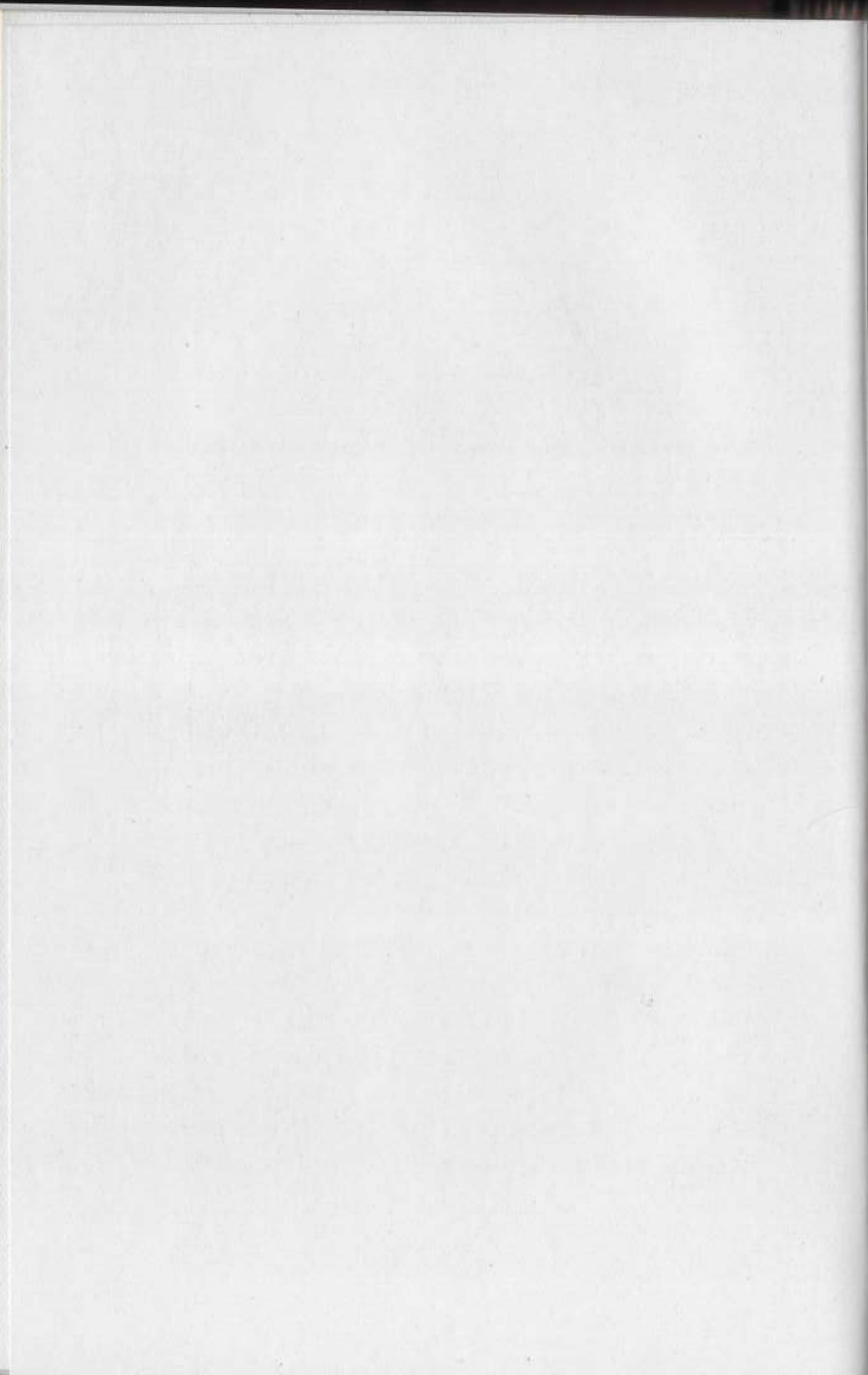



FIG. C. Aciri di uva in acqua di seltz.

FIG. A. e B. Il ventilatore solleva una burrasca in miniatura e le onde corrono lungo il bacino. Una goccia d'olio calma istantaneamente le onde, lo specchio d'acqua s'appiana (fig. B). Dopo un po' l'olio viene soffiato all'altro estremo del bacino e le onde si formano di nuovo. Le fotografie sono state ritoccate per fare meglio risaltare la formazione delle onde.

FIG. C. Il chicco d'uva ed il palombaro di vetro unto sono portati alla superfice dell'acqua dalle bollicine che vi aderiscono: invece il palombaro di vetro terso non raccoglie bollicine e sta al fondo.

tando magari anche un certo carico. Lo si può persino riempire d'acqua, che non si deve però versare bruscamente bensí su un pezzo di carta che poi si leva (fig. 22). Per mostrare che le maglie sono sempre aperte possiamo dare allo staccio un brusco colpo, al che la pellicola acquea si rompe e l'acqua cade al suolo come pioggia.

Se si versa dell'acqua di seltz in un bicchiere dalle superfici terse e liscie, ben poche bolle salgono alla superfice; ma se il vetro è un po' sporco o ruvido vediamo salire correnti di bollicine. Una graziosa esperienza permette di illustrare questo fenomeno: quella ben nota dei chicchi d'uva nello sciampagna. Invece di quest'ultimo useremo piú modestamente dell'acqua di seltz. Un acino non viene bagnato dall'acqua epperciò quando lo si immerge nel bicchiere va a fondo, ove si copre rapidamente di bollicine (fig. C in tavola XII). Bentosto queste bollicine, che appaiono come tante piccole perle, sono in numero sufficiente a portare a galla l'acino. Questo non è molto piú pesante dell'acqua epperciò facile a sollevarsi. Alla superfice dell'acqua talune bollicine abbandonano il chicco d'uva, scoppiando nell'aria, in conseguenza di che l'acino affonda; raccolto di nuovo un sufficiente numero di bollicine, il chicco torna a galla ed il gioco si ripete per alcuni minuti finché l'acqua di seltz si è esaurita.

È interessante immergere nell'acqua di seltz due

perle vuote di vetro invece che degli acini d'uva. Se le perle sono state pulite (basta una lavatura con acqua e sapone) non si formano bolle su di esse, epperciò permangono al fondo del bicchiere. Leviamone una, sfreghiamola con un dito ricoperto di grasso e torniamo a rimetterla nell'acqua: ora essa si comporta come un chicco di uva, raccoglie bollicine, si innalza, le perde alla superfice, torna al fondo e cosí via.

Vediamo ora come si formano le bollicine di anidride carbonica nell'acqua di seltz: le particelle gasose debbono raccogliersi e respingere tutt'all'intorno le molecole d'acqua. Ma queste si tengono strettamente unite tra loro e s'oppongono ad una separazione. Ecco perché non si formano bollicine in mezzo all'acqua. Lungo le pareti questa bagna il vetro (supposto che sia terso), oppure in altre parole: le molecole d'acqua aderiscono al vetro con una forza che supera quella della loro coesione. Perciò neppur qui si possono formare delle bollicine giacché dovrebbero strappare delle molecole d'acqua dal vetro. Ben diverso è il caso quando la superfice è untuosa e le molecole non aderiscono realmente al vetro ma vi sono unicamente premute contro dalla massa d'acqua che si trova dietro di esse. Allora le bollicine di gas trovano uno spazio per svilupparsi e rapidamente crescono di volume. Quando la bollicina ha acquistato una certa grandezza, è piú facile

per essa di respingere indietro l'acqua circostante. Anche questo comportamento si può ottimamente illustrare con un altro esperimento di Boys sulle bolle di sapone. Per mezzo di un tubo a T si soffiano due bolle di sapone di differente grandezza ai due estremi del tubo; dapprincipio le due bolle sono separate da un rubinetto inserito nel tubo; aprendo questo rubinetto in modo che le due bolle possano comunicare tra loro, quella piccola gonfia la grande, riducendosi fino a scomparire. Delle molte bollicine nell'acqua di seltz che aderiscono al vetro oppure agli acini d'uva, le piú grandi hanno la tendenza di assorbire le piccole e tutt'insieme quella di fondersi in una unica grande bolla.

Talora si vedono salire a galla delle piccole correnti di bollicine aventi origine in determinati punti delle pareti di vetro del bicchiere; esse sono dovute ad irregolarità del vetro (forse piccole protuberanze) ove una bolla, quando tende a formarsi, esce subito dallo stadio iniziale dei piccoli diametri.

Questa tendenza dei corpi sott'acqua di raccogliere bollicine e di salire con esse alla superfice è diventata la base di una grande industria metallurgica. Diversi minerali metallici, quando vengono finemente macinati, formano una miscela di minuta sabbia, per esempio di quarzo o di varii silicati e di solfuri metallici; si è trovato possibile di trattare questa miscela con acqua e poco olio in modo che

questo rivesta solo le particelle contenenti il metallo, il quale perciò non viene bagnato dall'acqua, mentre la sabbia rocciosa rimane pulita e bagnata. La massa viene allora fatta schiumeggiare; tutte le particelle contenenti metallo catturano delle bollicine d'aria, epperciò vengono a galla con la schiuma. Il resto del minerale, quello sterile, resta al fondo e cosí con questo procedimento, detto « per fluttuazione », si riesce a separare facilmente il minerale utile dalla sua ganga.

Un ulteriore esperimento chiarirà ancora meglio questi concetti. Sappiamo che l'acqua si solleva lungo le pareti di un recipiente di vetro terso che lo contiene. Le molecole d'acqua aderiscono al vetro arrampicandosi per cosí dire le une sulle spalle delle altre per soddisfare la loro bramosia di giungere al vetro. Se immergiamo verticalmente nell'acqua due lastre di vetro parallele e a piccola distanza fra loro, l'acqua sale fra le due lastre innalzandosi sopra il livello del resto del liquido. Le molecole che s'arrampicano su una delle lastre aiutano quelle che s'arrampicano lungo la lastra di fronte; abbiamo qui un cosidetto fenomeno di « capillarità »; il nome deriva dal fatto che il fenomeno è particolarmente marcato nel caso di tubi molto fini o capillari.

In un tubo capillare l'acqua s'eleva ad una notevole altezza, ad esempio circa 3 centimetri se il tubo ha un diametro interno di un millimetro. Se faccia-

mo galleggiare sull'acqua una sferetta di vetro vuota, l'acqua s'arrampica sulla superfice della sfera. Se avviciniamo tra loro due di queste palline galleggianti fino a circa un centimetro di distanza, esse si muovono l'una verso l'altra, fino ad urtarsi quasi con violenza. Capiremo meglio il perché della cosa considerando la fig. 23, che rappresenta due sferette

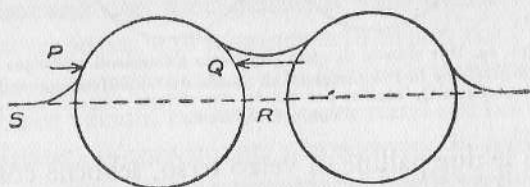



FIG. 23. Due sferette vuote di vetro galleggianti sull'acqua. La pressione in Q è minore che in R, poiché Q si trova ad un livello piú alto nell'acqua. La pressione in R è la stessa che in S perché R e S sono allo stesso livello. La pressione in S è quella atmosferica, che è la stessa agente in P. Quindi la pressione in P è maggiore di quella in Q e le due sferette vengono costrette ad avvicinarsi.

di vetro che galleggiano sull'acqua. La pressione in Q è minore di quella esistente lungo la linea punteggiata (specchio dell'acqua), perché Q si trova ad un livello piú alto del resto dell'acqua. La pressione a livello della linea punteggiata è quella dell'atmosfera, perché la linea punteggiata non rappresenta altro che la continuazione dello specchio d'acqua all'intorno. Perciò le due pressioni indicate con P, ambedue sensibilmente eguali alla pressione atmosferica, vincono le due pressioni segnate con Q e le due sferette vengono spinte l'una contro l'altra.

Se ora si fanno galleggiare sull'acqua due palline di paraffina oppure due sferette di vetro rivestite di paraffina, esse si attirano reciprocamente come

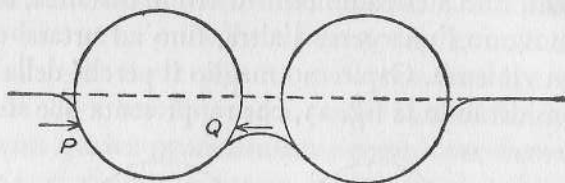



FIG. 24. Due sferette di vetro paraffinato galleggianti sull'acqua. La pressione in P è maggiore di quella dell'atmosfera epperciò di quella in Q, ragione per cui le due sferette vengono spinte l'una contro l'altra.

fanno le due palline di vetro terso, sebbene con un meccanismo un po' differente. Come è mostrato in fig. 24 le due sferette si coalizzano nel formare tra

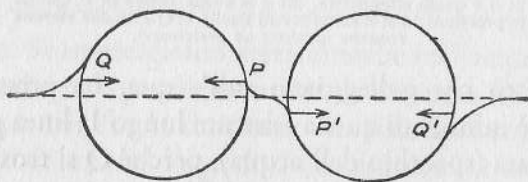



FIG. 25. La sferetta di sinistra è bagnata dall'acqua; quella di destra è paraffinata epperciò non viene bagnata. La pressione in P è maggiore di quella in Q e parimenti in P' maggiore che in Q'. Cosí le due sferette si respingonc.

loro un lieve affossamento nell'acqua e lo studio delle forze che agiscono su di loro mostra di nuovo che le pressioni sono tali da costringere le palline l'una contro l'altra. Invece una pallina di vetro terso sfugge una di paraffina o ricoperta di paraffina.

Questo effetto è un po' piú complicato, ma si può capire dalla fig. 25 che mostra le forze in azione. In un vaso di vetro terso nel quale l'acqua s'innalza lungo le pareti, le palline di vetro pulito si precipitano verso le pareti, dalle quali sono attratte come se fossero altre palline di vetro identiche. Per contro, le palline paraffinate si scostano dalle pareti. Se ora riempiamo con precauzione il vaso finché l'acqua quasi trabocca, e precisamente in modo che l'acqua non piú si curvi verso l'alto lungo le pareti del vaso, bensí verso il basso per raccordarsi col bordo del medesimo, i movimenti s'invertono: le palline di vetro pulite vengono respinte dai bordi verso il centro mentre quelle paraffinate vanno ad attaccarsi al vetro.

Tutti i fenomeni che abbiamo qui esposti sono illustrazioni di quel principio fondamentale che domina la formazione dei liquidi: l'attrazione fra gli atomi o le molecole è sufficientemente forte per mantenerli costantemente insieme, benché non sia cosí intensa da riunirli in un corpo solido e rigido. Ed è importante ricordarsi che una molecola si attacca all'altra in determinati punti; una parte di una molecola può attirare a sé una particolare zona di un'altra molecola. Per cui se due molecole si trovano di fronte, la tendenza loro di unirsi dipende da quali zone esse si presentano reciprocamente.

CAPITOLO QUARTO

LA NATURA DEI CRISTALLI: IL DIAMANTE

NEI capitoli precedenti abbiamo visto che quando gli effetti del moto vincono le forze attrattive, atomi e molecole godono di vita indipendente e formano un gas; inoltre che quando le forze attrattive sono un po' piú forti o gli effetti del moto un po' minori, le molecole si uniscono tra loro sotto forma di liquido. In tal caso si suppone che i legami fra le molecole sieno ancora di tanto allentati da lasciare loro la libertà di cambiare facilmente di posto e di compagne. Considereremo ora quell'ultimo caso nel quale le forze d'attrazione hanno nettamente il sopravvento. I legami fra le molecole sono piú numerosi e forse piú tenaci: ogni molecola è connessa alle sue vicine in piú di un punto della sua struttura sí da rimanere vincolata al proprio posto; in tal modo si è formato un corpo solido.

Le molecole sono assai diverse tra loro, per quanto riguarda la loro forma e le forze che esercitano l'una sull'altra. Quanto piú grandi sono queste forze tanto maggiore dev'essere l'agitazione molecolare necessaria ad allentare i legami delle molecole in un solido: in altre parole, tanto piú alto è il punto di fusione di quest'ultimo. Delle sostanze come il

diamante oppure il tungsteno, di cui si fanno i filamenti delle lampadine elettriche ad incandescenza, hanno una struttura cosí salda che bisogna elevarne la temperatura a piú migliaia di gradi centigradi prima che le loro molecole abbandonino la reciproca presa. Altre sostanze, come il burro e la naftalina, rimangono solide fino a una temperatura non molto superiore a quella ordinaria; altre infine, come l'anidride carbonica ed ancor piú l'ossigeno e l'idrogeno, debbono venire assai raffreddate per solidificarle. Si tratta sempre del gioco fra i due opposti fattori: il moto e l'attrazione, ed è facile capire come i punti di fusione dei vari corpi sieno cosí diversi tra loro.

Inoltre non bisogna rappresentarsi la molecola come un corpo di forma vaga ed indeterminata, esercitante un'attrazione sregolatamente diretta verso le sue simili. Quando due molecole vengono a trovarsi reciprocamente in presenza, possono sí e no saldarsi insieme: tutto dipende dal come si presentano l'una all'altra. Ogni molecola ha per cosí dire una sua conformazione o profilo caratteristico; considereremo piú attentamente il significato di queste espressioni quando penetreremo piú addentro nella questione. Le molecole si associano tra loro come se ciascuna avesse dei punti speciali di giunzione che devono trovarsi di fronte affinché il collegamento avvenga.

L'azione che si esercita fra le molecole non si dovrebbe usualmente paragonare all'attrazione generica fra due corpi carichi d'elettricità di segno contrario, ma piuttosto all'inchiodare insieme due parti d'una struttura meccanica, per esempio due membrature di un ponte in ferro. Come queste membrature debbono venir portate nella giusta posizione reciproca al fine di poter infilare i chiodi nei fori corrispondenti, cosí due molecole di una sostanza solida tendono a disporsi reciprocamente in modo che determinati punti dell'una possano agganciarsi saldamente a corrispondenti punti dell'altra. Le molecole possono associarsi in piú modi, epperciò dagli stessi elementi costruttivi nascere differenti strutture; vi sono per esempio differenti forme di solfo, silice e molte altre sostanze. Accade sovente che l'una disposizione è adottata per una certa temperatura, l'altra per un'altra e cosí via.

Di conseguenza, quando la molecola consta di piú atomi, per cui è probabile sia di struttura complicata e forma singolare, il solido che ne consegue assomiglierà ad un ricamo; possiamo paragonarlo ad un ponte in ferro composto di travi maestre, montanti e diagonali; è una costruzione assai lacunare poiché ogni membratura ha una forma caratteristica, generalmente lunga e stretta, ed è connessa alle adiacenti in punti ben definiti. La maggior parte delle sostanze organiche, come la naftalina

o una delle paraffine solide, hanno una struttura complicata di questo tipo, lacunare, cioè con molti spazii vuoti, sí che la densità di queste sostanze è piccola. Poche sostanze organiche sono molto piú pesanti dell'acqua. Quando le molecole sono meno complicate, meno irregolari nel loro contorno, possono associarsi in modo piú compatto; se le molecole contengono soltanto pochi atomi, come quelle del rubino ($Al_2 O_3$) che ne contiene cinque, oppure della pirite di ferro ($Fe S_2$), che ne contiene tre, ed ancor piú quando ne contengono uno solo, come nel caso del ferro e dell'oro, ove i concetti di atomo e molecola diventano equivalenti, l'agglomeramento diventa piú compatto ed il peso specifico delle sostanze aumenta.

Le infinite proprietà dei corpi solidi di questo mondo sono realmente l'espressione della stragrande varietà dei modi coi quali gli atomi e le molecole si combinano tra loro e dell'intensità dei loro legami. Non capiremo mai a fondo il comportamento dei materiali che giornalmente adoperiamo, finché non ci sarà nota almeno la disposizione degli atomi e delle molecole nei corpi solidi, nonché l'entità ed altre caratteristiche delle forze che li tengono assieme.

Ora, in questi ultimi tempi la scoperta dei raggi X ci ha messi in grado d'investigare profondamente l'architettura dei corpi solidi e di conoscere i particolari del piano secondo il quale sono costruiti.

Abbiamo fatto un gran passo verso lo scopo propostoci: quello di poter capire perché una sostanza composta di certi atomi ha precisamente certi requisiti di densità, resistenza, elasticità, conduttività termica ed elettrica e cosí via; oppure, in altre parole: perché reagisce in quel dato modo all'elettricità, al magnetismo, ad una forza meccanica, alla luce od al calore. Non possiamo ancora prevedere quanto lontano ci potranno portare i nostri nuovi mezzi d'indagine; ma è certo che ci faranno fare dei notevoli progressi apportandoci nuova luce intorno alle svariatissime maniere nelle quali vengono trattati materiali e strutture, sia con o senza conoscenza di cose, tanto in processi industriali quanto forse in talune azioni degli organismi viventi.

I nuovi metodi d'indagine sono specialmente applicabili ai corpi solidi come vedremo in questo e nel prossimo capitolo, i quali tratteranno in particolar modo dello stato solido. Essi si basano sull'uso combinato di raggi X e di cristalli per cui dovremo rivolgere dapprima la nostra attenzione ad ambedue questi soggetti. Incominceremo con i cristalli.

Immaginiamoci un liquido che si stia lentamente raffreddando e che sia proprio arrivato a quel punto, di cui abbiamo già parlato in precedenza, nel quale l'agitazione termica è già diminuita di tanto che le molecole o gli atomi stanno per saldarsi rigidamen-

te insieme. Essi si disporranno fianco a fianco in modo che le attrazioni dei varii punti degli uni per i varii punti degli altri vengano soddisfatte per quanto possibile. Possiamo immaginarci due molecole, già collegate per uno dei loro punti, le quali stieno oscillando l'una rispetto all'altra con ampiezza decrescente finché alla fine si realizza un secondo legame, magari improvvisamente. Indi può accadere che ciascuna delle due molecole venga ancora connessa per un terzo punto sia alla compagna sia ad un'altra molecola, rimanendo finalmente inchiodata nella sua posizione. Cosí, man mano che il liquido si raffredda, una molecola dopo l'altra assume il proprio posto accanto ad altre già tra loro concatenate ed il corpo solido cresce.

Oppure può avvenire che si riformi una sostanza solida, separandosi da una soluzione nella quale era stata disciolta. Evaporandosi il solvente le molecole s'incontrano con maggior frequenza, ciò che ne favorisce l'associazione. Quando il liquido è completamente scomparso, la sostanza è del tutto solida. Se l'evaporazione avviene lentamente, le molecole, migrando attraverso il liquido, arrivano incidentalmente in punti in cui si sono già depositate alcune altre molecole, alle quali allora s'associano, ciascuna assumendo tranquillamente la posizione giusta prima di fissarsi definitivamente oppure attendendo di prender posto finché il suo

orientamento rispetto alle altre molecole è quello che le conviene.

È facile comprendere che in queste circostanze può verificarsi una regolarità nella disposizione delle molecole. Supponiamo che un corpo appiattito come A in fig. 26 possieda quattro centri d'attrazione, due positivi e due negativi, distribuiti come indicato in figura. Se dovessimo disporre un certo numero di simili elementi su una superfice piana connettendoli in modo che sempre un centro positivo risulti affacciato ad uno negativo, arriveremmo ad un assetto come mostrato in fig. 26.

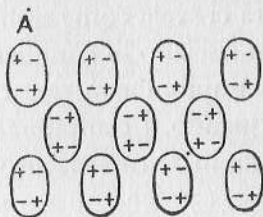



FIG. 26.

In qualunque modo procedessimo, troveremmo naturalmente sempre nel risultato del nostro ordinamento una certa regolarità, analoga a quella della fig. 26. Ed in apparenza la natura procede in modo analogo: le molecole giacciono l'una accanto all'altra in ordinata schiera. Questo punto è d'una importanza capitale. L'ordine e la regolarità sono la conseguenza del completo soddisfacimento delle attrazioni reciproche fra atomi o molecole. Quando l'edificio è tanto cresciuto da risultare visibile al microscopio od anche all'occhio nudo, si palesa la regolarità della sua struttura ed abbiamo davanti

a noi ciò che chiamiamo un cristallo. Questo è limitato da un certo numero di superfici piane, spesso in apparenza perfettamente levigate sí che il cristallo acquista una sua particolare bellezza dovuta in parte al suo splendore, in parte alla perfetta regolarità del suo abito. Sentiamo che una recondita armonia deve presiedere alle leggiadre e gradevoli caratteristiche dei cristalli ed è infatti cosí. La natura ci svela come si dispongono le molecole quando si lasciano in completa libertà. Essa costruisce i suoi campioni con due o tre molecole al massimo, e, quando il campione o germe è completo, presenta già in sé tutte le proprietà del cristallo che ne nascerà poiché questo si forma unicamente per ripetizione del primitivo disegno. Attraverso il cristallo intravediamo perciò le prime pietre costruttive della natura; dobbiamo però a questo scopo armare per cosí dire i nostri occhi con delle forti lenti. I nuovi metodi d'indagine coi raggi X costituiscono appunto queste lenti. Alcune forme di cristalli sono visibili nella tavola XIII.

Vi sono tre differenti stadi di costruzione della materia: l'atomo singolo, quale lo incontriamo nel gas elio; la molecola, quale si studia in chimica; e l'elemento cristallino o unità di cristallo che ora esamineremo ai raggi X. Questo elemento cristallino è la piú piccola porzione di un cristallo che, ripetuta nello spazio senza cambiarne il carattere e

TAVOLA XIII.

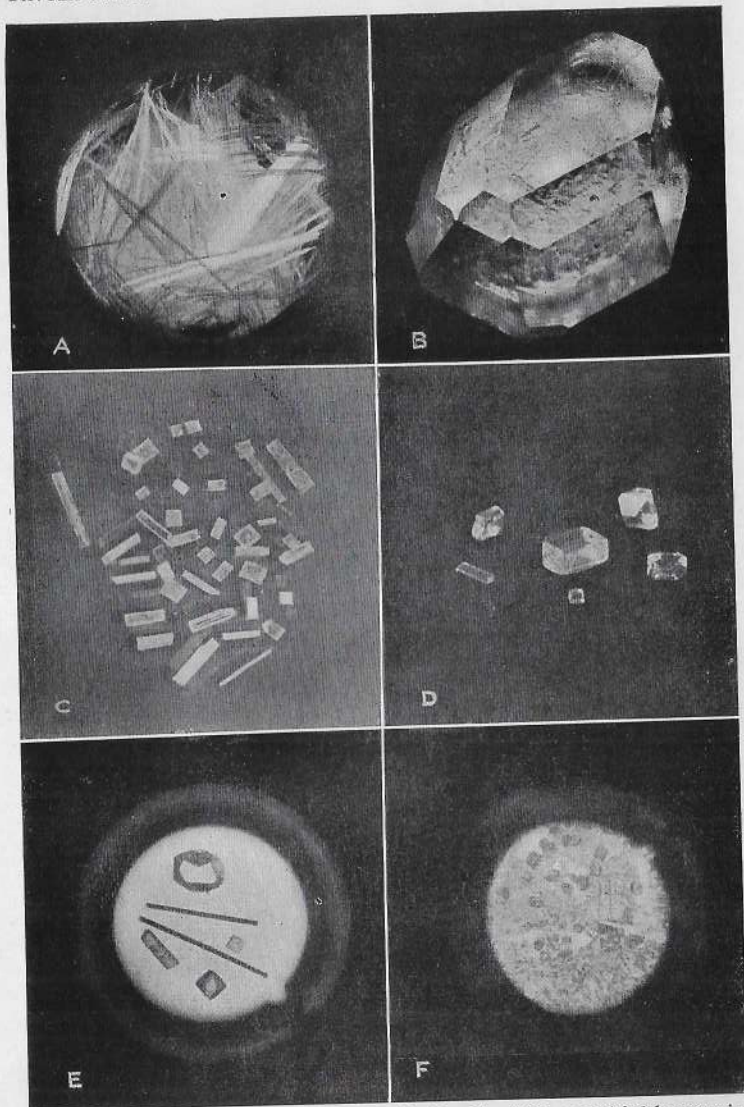



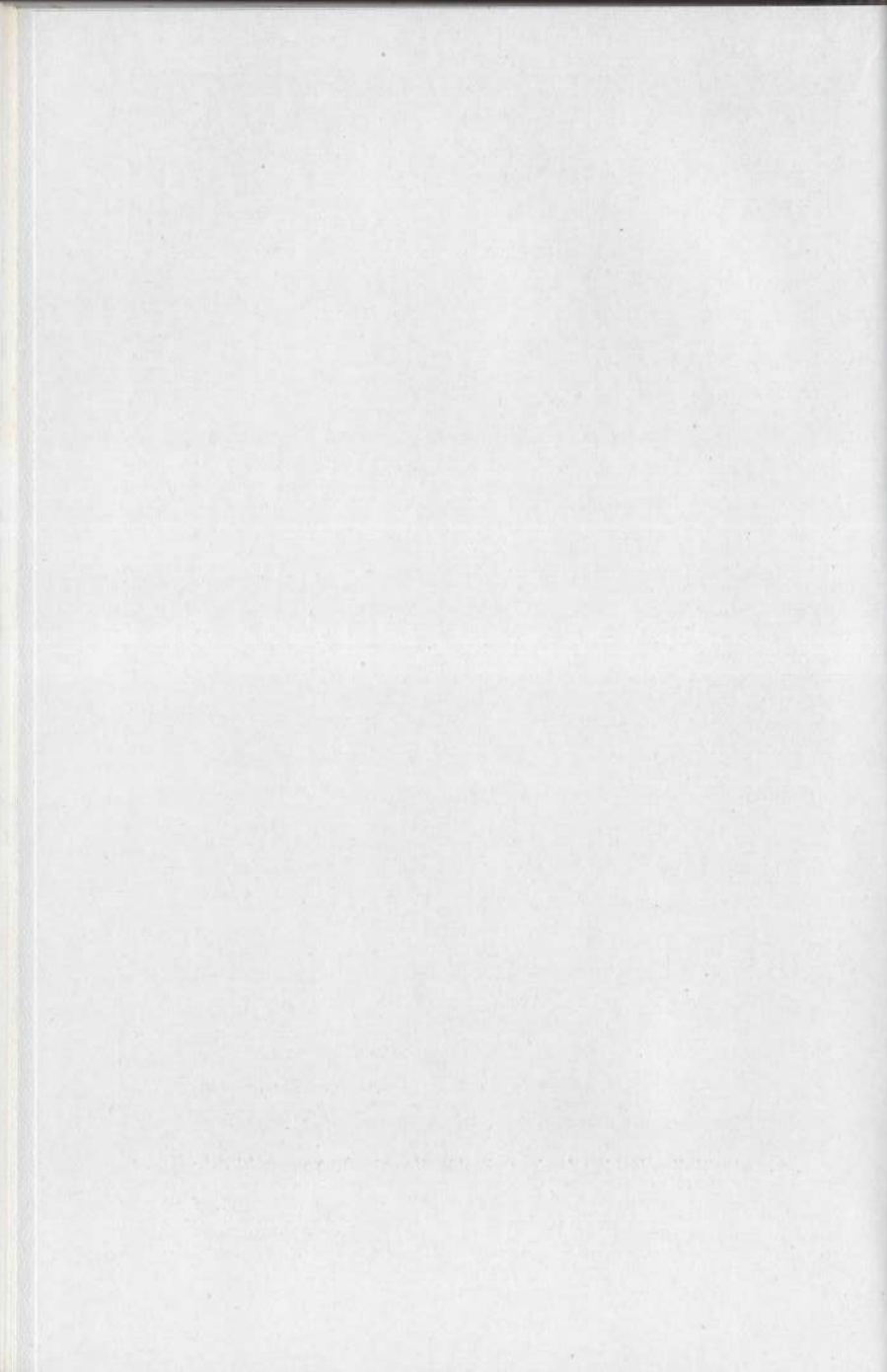
FIG. A. Cristalli di anidride solforica (triossido di solfo, SO_3) separatisi dal vapore in un vaso di vetro. FIG. B. Cristallo di eritrite cresciuto in soluzione. FIG. C. Cloruro ammonico (NH_4Cl): cristalli cubici perfetti ed altri irregolarmente cresciuti da una soluzione contenente urea. FIG. D. Cristalli diversi di quercite e cocosite. FIG. E. Cristalli di alizarina, allume di rubidio, cloruro sodico, solfato doppio di cobalto ed ammonio, acido ftalico. FIG. F. Cloruro ammonico: cristalli ottaedrici e cubici da una soluzione contenente urea.

l'orientazione, genera l'intero cristallo. Per fare un esempio, noi abbiamo *atomi* di silicio e di ossigeno. La *molecola* dell'anidride silica (biossido di silicio, $Si\,O_2$) contiene un'unità (atomo) di silicio e due unità (atomi) di ossigeno, disposti sicuramente in modo particolare. Finalmente abbiamo il quarzo il cui *elemento cristallino* consiste in tre molecole di biossido di silicio disposte, di nuovo, in maniera particolare e precisamente secondo una spirale, come oggi sappiamo. Il cristallo di quarzo consta di un'innumerevole ripetizione di questa unità.

FIG. 27. Modelli di strutture elicoidali.
A. Un sol tipo di cavicchi, ovverossia tutti eguali tra loro e tutti orientati nello stesso modo.
B_1 e B_2. In ciascuno di questi casi vi sono due tipi di cavicchi, gli uni diretti a sinistra, gli altri a destra; ne nascono due disposizioni.
C_1 e C_2. Tre tipi di cavicchi, perché orientati in tre modi diversi; le due disposizioni C_1 e C^2 rappresentano rispettivamente una vite destrogira e sinistrogira.

Ciascun elemento cristallino presenta tutte le proprietà del quarzo e, in realtà, è quarzo; invece una molecola separata di biossido di silicio non è quarzo. Per esempio, una delle proprietà piú note del quarzo è quella di far ruotare il piano di polarizza-

zione della luce e questa proprietà dipende dalla caratteristica spiraliforme dell'elemento cristallino del quarzo.

Per realizzare la spirale occorrono tre molecole. Consideriamo i modelli della fig. 27: dei cavicchi di legno sono infissi in un'asta cilindrica; se facciamo i cavicchi tutti eguali tra loro, se cioè il nostro modello consta di cavicchi tutti identici per qualità ed orientazione, abbiamo il tipo della fig. A. Con due specie di cavicchi per modello possiamo ottenere i tipi delle fig. B_1 e B_2. Con tre specie di cavicchi i tipi C. I cavicchi sono qui disposti secondo una spirale destrogira come in C_1 oppure levogira come in C_2. Ora i raggi X ci rivelano precisamente che l'elemento cristallino del quarzo contiene tre molecole disposte secondo una spirale, il che è in perfetta concordanza con l'abito del cristallo. In realtà di cristalli di quarzo ve ne sono di due forme, tra loro enantiomorfe, rappresentate in fig. 27 A. In una di queste le facce *x*, *s*, *r'* si succedono secondo una spirale levogira, mentre nell'altra le corrispondenti facce seguono una spirale destrogira. Queste due disposizioni si possono perciò ritenere come una conseguenza dell'esistenza dei due tipi d'elemento cristallino, quello levogiro e quello destrogiro del quarzo. I due cristalli della fig. 27 A sono l'uno l'immagine speculare dell'altro, cosí come la mano destra è l'immagine speculare della sinistra. Gli anti-

chi greci chiamavano il quarzo o cristallo di rocca col nome di « krystallos » o ghiaccio perché lo ritenevano dell'acqua congelata ed indurita all'estremo dal gran freddo delle montagne. La nostra scelta

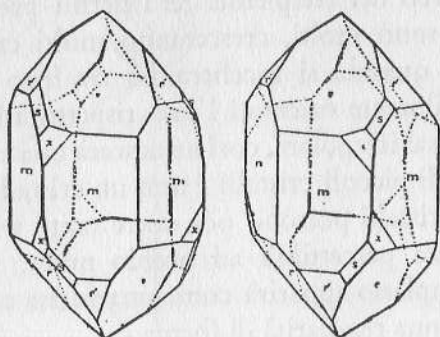



FIG. 27 A.

del quarzo come illustrazione del concetto di struttura cristallina è quindi in certo qual modo appropriata.

Possiamo ora domandarci: perché non tutti i corpi solidi hanno forma cristallina, dato che la disposizione piú naturale delle molecole è quella regolare? Al che dobbiamo anzitutto rispondere che un grosso e perfetto cristallo non può derivare che dall'accrescimento di un germe unico. È difficile a dirsi che cosa arresta dapprima il moto relativo di due o tre molecole del liquido che si sta raffreddando, le unisce e ne fa la pietra iniziale, cui si andranno aggiungendo le altre molecole dell'edificio

cristallino. Forse l'incontro delle prime molecole è dovuto ad un mero caso; forse è la presenza di qualche minuta particella di sostanza estranea che serve da punto di partenza, oppure qualche irregolarità delle pareti del recipiente. Se i germi presenti nel liquido sono molti, cresceranno molti cristalli; e siccome quando si toccheranno tra loro saranno verosimilmente orientati l'uno rispetto all'altro in modo assai irregolare, cosí ne nascerà una massa indefinita di piccoli cristalli e non un cristallo unico. Questi cristalli possono poi essere tanto piccoli da non essere percettibili ad occhio nudo, sicché il loro complesso apparirà come una massa compatta senza alcuna regolarità di forma.

Affinché possa svilupparsi un cristallo perfetto di notevoli dimensioni occorre che le molecole trovino pochi germi sui quali posarsi; inoltre i cristalli debbono, di solito, poter crescere molto lentamente e quietamente, affinché ogni molecola abbia tutto il tempo d'accomodarsi nella giusta posizione. Le molecole debbono infine essere dotate ancora di tanto moto da conferire loro la necessaria libertà d'azione. Queste condizioni sono accuratamente osservate dal cristallografo quando vuole allevare dei cristalli. Se per esempio desidera ottenere un grosso cristallo di sale da una salamoia, sospenderà in questa un piccolo e perfetto cristallo e regolerà cosí accuratamente la temperatura del bagno che

gli atomi di cloro e sodio sieno tentati a perdere la loro libertà solo quando incontrano un gruppo di atomi già perfettamente ordinati, cioè quando s'im-

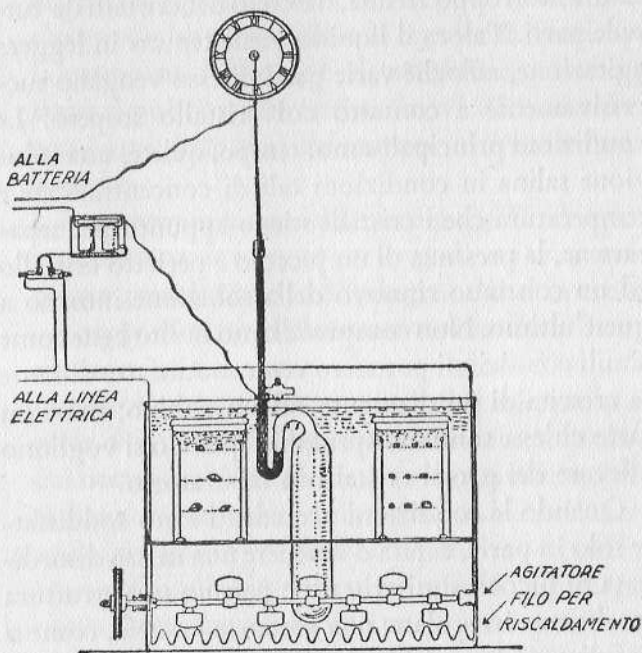



FIG. 28. Il termostato.

I vasi nei quali stanno sviluppandosi i cristalli sono immersi in un bagno che non deve subire variazioni irregolari ed improvvise di temperatura, la quale deve invece calare lentamente giorno per giorno. A questo fine essa viene regolata da un dispositivo elettrico di riscaldamento: se la temperatura s'innalza di troppo, si dilata il liquido nel grosso termometro centrale immerso nel bagno; il mercurio che sale chiude un circuito elettrico facendo funzionare un elettromagnete che interrompe il circuito di riscaldamento. Dal cronometro pende un filo, che s'abbassa molto lentamente nel mercurio del termometro, di modo che la temperatura alla quale viene interrotto il circuito di riscaldamento diminuisce continuamente. Sul fondo del bagno si vede un filo elettrico a zig-zag che serve per il riscaldamento del bagno e sopra di esso un agitatore a palette.

battono nel piccolo cristallo di sale sospeso nella soluzione. Quando questa diventa troppo calda, il cristallo sospeso si dissolve nella soluzione non piú satura; se troppo fredda, nascono dei cristalli da tutte le parti. Talora il liquido viene tenuto in leggera agitazione, affinché varie parti di esso vengano successivamente a contatto col cristallo sospeso. Le condizioni principali sono: tempo, quiete, una soluzione salina in condizioni tali di concentrazione e temperatura che i cristalli stieno appunto per separarsene, la presenza di un piccolo e perfetto cristallo ed un continuo rinnovo della soluzione intorno a quest'ultimo. Non comprendiamo molto bene come simili condizioni potessero venir soddisfatte durante la crescita di un diamante od un rubino; ma è un fatto ch'esse sono indispensabili quando si vogliono allevare dei grossi cristalli in laboratorio.

Quando le condizioni precedenti sono soddisfatte solo in parte, capita d'ottenere una massa disordinata di piccolissimi cristalli e persino una struttura totalmente irregolare: una sostanza amorfa, come si usa dire. Ciò potrebbe bastare per spiegare l'apparente rarità dei cristalli; dobbiamo poi considerare che molti corpi hanno una struttura assai complessa, costituiti come sono da molte sostanze, ognuna delle quali ha una forma naturale tutta sua. I raggi X ci dicono che i cristalli non sono cosí rari come siamo propensi a credere, e persino in quei casi nei

quali la cristallizzazione non è manifesta, la natura si è sforzata di ottenere una struttura regolare che sfuggí all'osservazione finché non avemmo i mezzi necessari per rivelarla. Nei cristalli visibili ad occhio nudo è ben manifesta la regolarità con la quale la natura ne dispone gli elementi; ma questa regolarità si può scoprire anche altrove. Come vedremo essa è una delle basi del successo dei nuovi metodi d'analisi.

Passeremo ora a considerare i raggi X ed esporremo anzitutto le ragioni per le quali essi ci sono stati di cosí grande aiuto nell'indagine che ci interessa.

I raggi X sono della stessa natura della luce e si distinguono da questa solo per la loro diversa lunghezza d'onda. La luce emessa dal Sole, dalle lampade elettriche, da una candela accesa, e percepita dai nostri occhi abbraccia solo una ristretta gamma di lunghezze d'onda. La lunghezza delle piú lunghe onde luminose è meno di un millesimo di millimetro; quella delle piú corte circa la metà. Queste grandezze rispondono bene agli scopi per i quali le usiamo. Col « vedere » un oggetto noi intendiamo l'osservazione delle variazioni che l'oggetto in questione produce nella luce proveniente dalla sorgente luminosa e raggiungente il nostro occhio per la via dell'oggetto. Occhi e cervello hanno acquistato per lunga pratica una meravigliosa abilità nel rilevare ed interpretare tali variazioni. Ma non ci riescono

piú se l'oggetto è troppo piccolo; né bisogna credere che ciò dipenda unicamente dal fatto che un oggetto piccolo provochi solo una piccola variazione nella luce. Vi è una seconda e piú sottile ragione: la «natura» dell'effetto cambia quando le dimensioni dell'oggetto sono all'incirca paragonabili o persino inferiori alla lunghezza dell'onda luminosa.

Supponiamo di camminare lungo la riva del mare osservando le onde. Nel corso della nostra passeggiata ci potrà accadere di capitare in un luogo ove le onde sono piú deboli; ricercandone la causa, ci accorgiamo che la riva è difesa al largo da una catena di scogli a fior d'acqua. Ecco un'analogia con un'ombra ottica: la lontana burrasca che ha suscitato le onde si può paragonare al Sole, la riva sulla quale battono le onde alla Terra da esso illuminata, e la catena di scogli ad una nuvola che getta la sua ombra sulla Terra. L'ombra ottica ci mette in grado di rivelare la presenza della nuvola, mentre la calma lungo la riva ci fa intuire l'esistenza degli scogli. Ora le dimensioni della scogliera sono probabilmente molto maggiori della lunghezza delle onde in arrivo (cioè della distanza da cresta a cresta delle onde). Se al posto della scogliera si trovasse impiantato nel fondo un palo che emergesse sulla superfice del mare, l'effetto sarebbe troppo lieve per essere percettibile. Il che è senz'altro evidente. Ma

TAVOLA XIV.

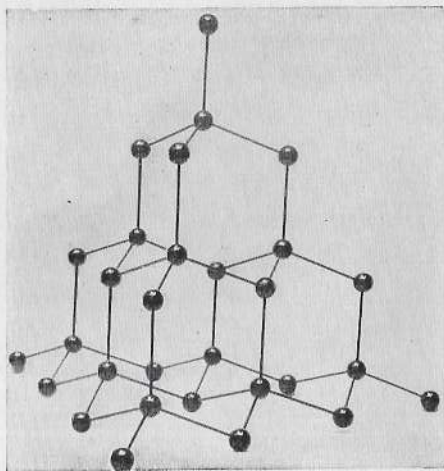



FIG. A. Modello di diamante.

Questo modello mostra solo la disposizione degli atomi di carbonio senza considerare la loro grandezza e forma.

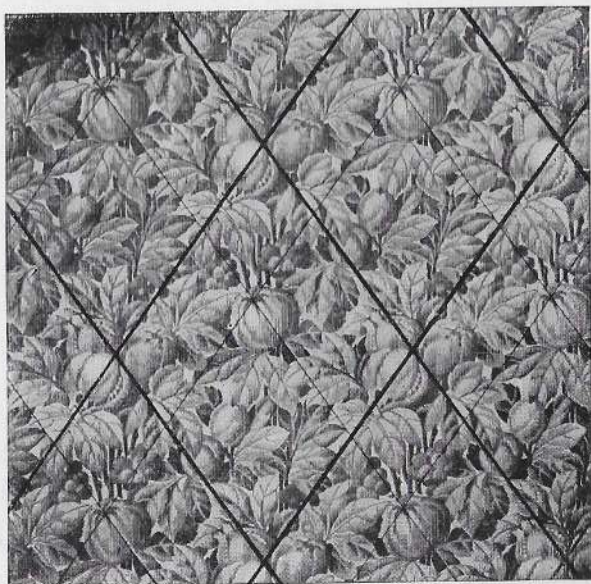
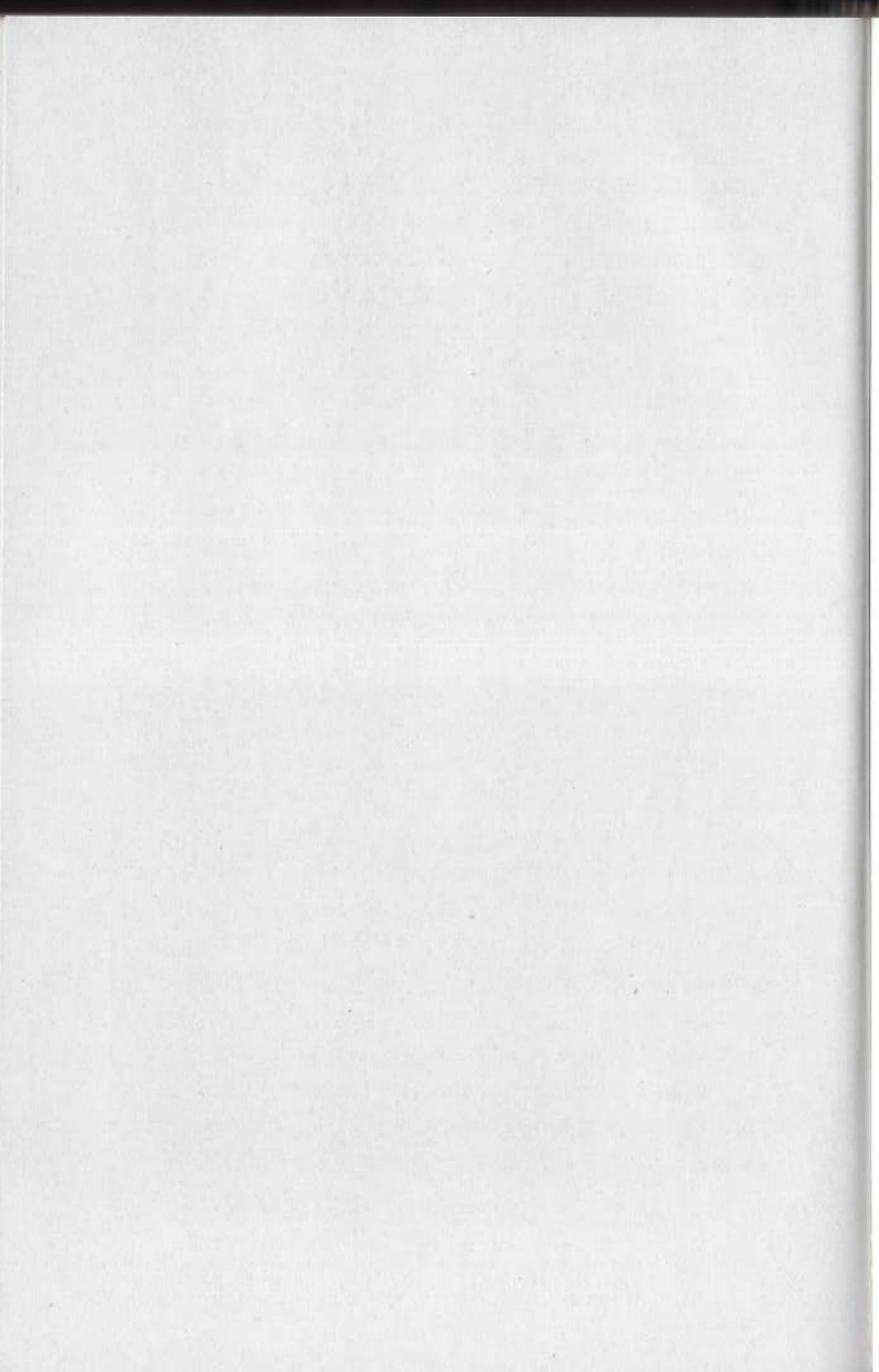



FIG. B. Un pezzo di tappezzeria.

La cellula elementare è contrassegnata in due modi: con righe grosse (a) e con righe sottili (b). La forma ed il contenuto delle cellule sono esattamente i medesimi nei due casi, benché i vertici delle due specie di cellule sieno stati scelti differenti.

anche se fossero infissi nel fondo del mare un gran numero di pali in modo che gli effetti dei singoli pali si sommassero, fornendone uno paragonabile a quello della scogliera, l'ombra risultante non ci svelerebbe nulla intorno ad ogni palo individuale. Il diametro di ciascun palo è troppo piccolo al confronto della lunghezza dell'onda per imprimere a questa una caratteristica permanente; le onde sorpassano il palo, si richiudono di nuovo dietro di esso e non ne portano traccia. Ma se invece il mare è calmo, eccetto un leggero increspamento dovuto ad una lieve brezza, ciascun palo getterebbe una « ombra » che persisterebbe almeno su una piccola distanza sottovento. L'increspamento è piú breve del diametro del palo, epperciò ogni palo produrrà dietro di sé una certa « ombra ».

Nello stesso identico modo le onde luminose passanti sopra molecole molto piú piccole di esse non ne ricevono impressioni tali da venir percepite dagli occhi e dal cervello come effetti distinti delle singole molecole. Ed è inutile cercare di vincere questa difficoltà ricorrendo a strumenti. Il microscopio accresce il nostro potere di percezione: col suo aiuto possiamo vedere oggetti, supponiamo, mille volte piú piccoli di quelli visibili ad occhio nudo. Ma fallisce quando cerchiamo di vedere cose dello stesso ordine di grandezza delle onde luminose e nessun progresso nella fabbricazione ottica ci può

portare oltre. I raggi X sono per contro una decina di migliaia di volte piú fini della luce ordinaria e, presupposto di poter rimpiazzare l'occhio con un organo adatto e sensibile, ci mettono in grado di penetrare diecimila volte piú addentro nella minutezza strutturale della materia. Il che ci porta comodamente nel mondo degli atomi e delle molecole, le cui misure in lunghezza, larghezza e spessore sono dell'ordine dei centomilionesimi di centimetro, ordine di grandezza che è pure quello delle lunghezze d'onda dei raggi X. È perciò lecito affermare all'ingrosso, che la scoperta dei raggi X ha aumentato di diecimila volte l'acutezza della nostra visione, sicché possiamo ora « vedere » individualmente gli atomi e le molecole.

Metteremo ora in relazione i raggi X con i cristalli e di nuovo considereremo dapprima la questione nelle sue grandi linee. Sebbene ogni molecola eserciti un'azione sui raggi X, come nella nostra analogia ciascun palo sulle piccole onde del mare, tuttavia l'effetto prodotto dalla singola molecola è troppo piccolo. Ma nel cristallo le molecole sono in numero enorme e regolarmente disposte; sicché può avvenire che, quando un fascio di raggi X cade sul cristallo, gli effetti prodotti dalle varie molecole combinino e sieno concordanti, epperciò, sommandosi, diventino sensibili. Un'altra analogia ci aiuterà a capire il fenomeno. Se un soldato esegue

dei movimenti col fucile a baionetta inastata, può avvenire che lo scintillío della lama sotto il sole passi inosservato un chilometro piú lontano, a causa della sua debolezza. Ma se il soldato appartiene ad un corpo di truppa, i cui uomini marcino ordinatamente in una certa direzione fissa, eseguendo lo stesso movimento, il lampeggiamento delle baionette si percepirà comodamente a diversi chilometri di distanza. Grazie alla finezza dei raggi X ogni atomo o molecola esercita la sua azione e, grazie alla loro regolare disposizione nel cristallo, queste azioni si sommano e si rendono percettibili.

Passiamo a considerare piú da vicino in qual modo le proprietà caratteristiche dei raggi X e dei cristalli concorrono nel nuovo metodo d'analisi. La spiegazione è forse un po' difficile da intendersi, epperciò abbiamo cercato di esporre quanto precede e segue in modo che la spiegazione possa venir saltata da chi preferisca in un primo tempo di tralasciarla. Chi ad ogni modo desidera approfondirsi in materia, bisogna che tosto o tardi la conosca a fondo.

Abbiamo visto che gli atomi e le molecole di un cristallo si trovano in questo regolarmente disposti ed abbiamo persino esposto le ragioni per le quali è da attendersi questa regolarità. Supponiamo ora di trovarci davanti alla tappezzeria di una stanza e di esaminarne il disegno. Questo è la ripetizione

di una qualsiasi unità o campione elementare di disegno (fig. B in tavola XIV). Contrassegniamo un particolare qualsiasi del campione, ogni volta che si ripete nella tappezzeria; se non possiamo farlo materialmente lo faremo soltanto mentalmente; colleghiamo questi punti particolari con delle rette

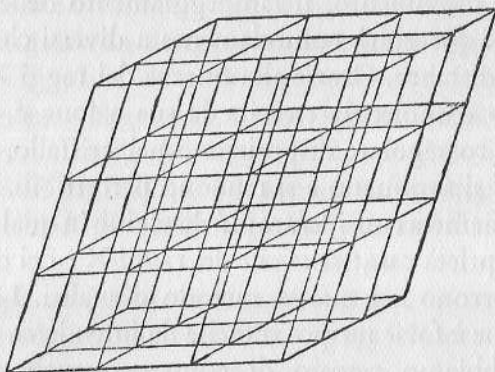



FIG. 29. Un reticolo spaziale.

che nel secondo caso saranno solo ideali, ma non importa: l'insieme delle rette formerà un reticolato a maglie rombiche; reticolato che avrà sempre la stessa forma qualunque sia il punto del disegno scelto e contrassegnato. Naturalmente campioni diversi di tappezzeria dànno rombi di forma e grandezza differente, ma che hanno sempre quattro lati eguali. Talora invece di rombi si hanno anche rettangoli; comunque, l'insieme dei punti contrassegnati lo chiameremo un « reticolo ». Ogni rombo

contiene un'unità di disegno della tappezzeria con tutti i suoi particolari e nulla piú.

La disposizione nello spazio delle unità di cristallo od elementi cristallini è analoga a quella superficiale delle unità di disegno della tappezzeria, con la sola differenza che il reticolo invece che a due dimensioni è a tre, cioè spaziale (fig. 29). Ciascuna piccola cellula del reticolo spaziale è limitata da sei facce, a due a due parallele. La cellula può avere qualsiasi lunghezza di lato ed angoli qualsiasi ai vertici; la sua forma piú semplice e regolare è quella cubica. Ogni cellula contiene una intera unità di cristallo con tutte le sue particolarità e null'altro: essa rappresenta perciò l'unità di cristallo medesima, che possiede tutte le qualità del cristallo completo, per quanto grande quest'ultimo possa essere. Nel quarzo, per esempio, la cellula ha la forma mostrata in fig. 30 e contiene tre molecole di biossido di silicio ($Si O_2$). Contenuto, forma e dimensioni della cellula sono facilmente determinati mediante i raggi X, come vedremo; ma è assai piú difficile stabilire qual è la disposizione di questo contenuto, cioè la disposizione degli atomi o molecole all'interno della cellula.

FIG. 30. Forma e dimensioni della cellula elementare del cristallo di quarzo in centomilionesimi di centimetro.

Supponiamo di poter guardare entro il cristallo,

lungo uno degli spigoli di cellula della fig. 29, e di poter disegnare ciò che vediamo, nel modo indicato nella fig. 31. Ad ogni vertice del reticolo è associato un gruppo di atomi, indicati in figura ed in modo del tutto arbitrario con una serie di circoletti. La forma del gruppo non ha importanza; e nemmeno il suo contenuto; questo può essere costituito da un numero qualsiasi di atomi e molecole: l'importante è che un gruppo, sempre l'identico, sia associato a ciascun vertice del reticolo, come nel disegno della tappezzeria.

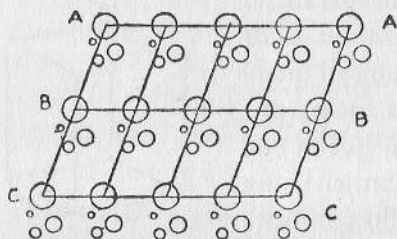



FIG. 31. Rappresentazione schematica degli aggruppamenti atomici nel reticolo. Ogni gruppo è costituito da quattro atomi rappresentati da circoletti di diverso diametro. Tutti i gruppi sono uguali tra loro.

Il cristallo venga ora colpito da un fascio di raggi X; nella fig. 32A le fronti d'onda dei raggi incidenti sono rappresentate dal segmento WW e dalle parallele a WW. Quando queste onde arrivano sulla fila di gruppi disposti lungo AA — ogni gruppo essendo ora rappresentato da un sol punto — una nuova serie di onde consimili s'irradierà da ciascun gruppo, mentre contemporaneamente il fascio di raggi incidenti continua la sua strada; proprio come di una fila di pali infissi nel fondo del mare

ciascuno diventa il centro d'una perturbazione, quando viene colpito da un'onda. Ad una determinata piccola distanza dalla fila AA queste piccole perturbazioni si riuniscono in fronti d'onda rappresentate dai segmenti *aa* tutti tra loro paralleli.

L'effetto è analogo a quello della riflessione del suono da parte di una palizzata oppure di un pezzo teso di mussolina. Anche qui la parte principale dell'onda procede oltre, ma si genera anche un'onda riflessa che fa con la superfice riflettente lo stesso angolo dell'onda incidente. Le onde riflesse formano un treno d'onde identico all'incidente in quanto a lunghezza d'onda, ma naturalmente piú debole: si potrebbe credere che la riflessione dovesse produrre un confuso ammasso di increspature, ma non è cosí. Molto vicino ai gruppi regna un'apparente confusione, ma un po' piú oltre, lungo il percorso delle

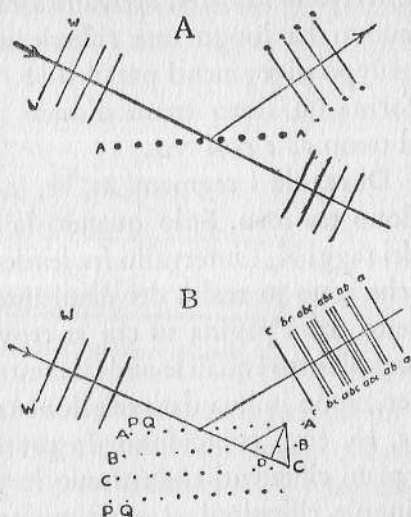



FIG. 32. Riflessione dei raggi X.

onde riflesse, queste si fondono in un unico treno d'onde *aa*, ecc.

Dietro la fila di gruppi AA ve n'è un'altra, esattamente eguale alla prima, disposta secondo BB (fig. 32 B). Le onde incidenti, che l'esperienza dimostra venir assai poco indebolite dal loro passaggio attraverso la fila AA, arrivano ora sulla fila BB e di nuovo ha luogo una riflessione rappresentata dal gruppo di segmenti paralleli *bb*. Una terza fila CC forma un terzo treno d'onde *cc*, una quarta DD il treno *dd* e cosí via.

Di regola i segmenti *aa*, *bb*, *cc*, ecc., non coincidono tra loro. Solo quando la lunghezza d'onda dei raggi X, l'intervallo fra le file AA, BB, CC ecc. (che sono in realtà dei piani intersecati ad angolo retto dalla pagina su cui si trova la fig. 32) e gli angoli sotto i quali le onde incontrano AA, BB, CC, ecc., sono in una data relazione tra loro, i segmenti *aa*, *bb*, ecc., coincidono. In pratica sono migliaia i piani riflettenti che entrano in gioco e quando le singole riflessioni si sovrappongono esattamente, rinforzandosi l'un l'altra, la riflessione complessiva è intensa. Ma se la suddetta relazione non è soddisfatta, le singole onde riflesse non si sovrappongono esattamente, come è indicato nel disegno della fig. 32, e l'effetto complessivo è meno sensibile; le une gettano le loro creste, o ciò che corrisponde alle creste delle onde d'acqua, negli avvallamenti delle altre,

dando luogo ad interferenze ed estinzioni del moto ondulatorio. L'impostazione reciproca fra raggio incidente e cristallo dev'essere estremamente esatta a causa del gran numero di superfici riflettenti successive. È facile trovare la formola che esprime la condizione per una giusta impostazione e quindi ottenere una riflessione. La spezzata A' B' B deve

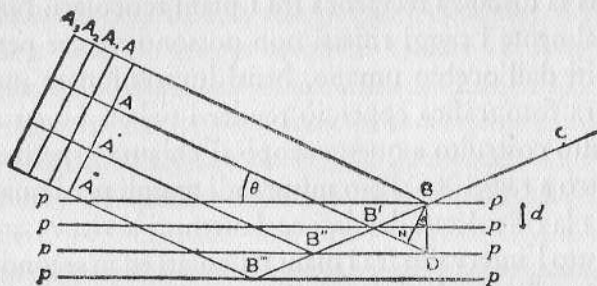



FIG. 33. La legge di riflessione dei raggi X.

essere piú lunga di AB d'un numero intero di lunghezze d'onda. Se λ rappresenta la lunghezza d'onda, d l'intervallo fra i piani riflettenti e θ l'angolo indicato in fig. 33, deve essere

$$n\lambda = A'B'B - AB = A'D - AB = DN = 2d \operatorname{sen}\theta,$$

ove n è un numero intero.

Non è necessario, come abbiamo già detto, che il lettore approfondisca il precedente ragionamento, dal quale derivò l'equazione fondamentale del nuovo metodo d'indagine.

L'essenziale è di tener presente che, se la direzione

dei raggi incidenti viene gradualmente variata, non si avvererà alcuna riflessione apprezzabile finché i detti raggi non formeranno coi piani reticolari AA, BB, ecc. un angolo appropriato. Ora, misurando quest'angolo d'incidenza e conoscendo la lunghezza d'onda dei raggi X usati (come è sempre il caso nell'analisi cristallina), la formola precedente ci dà la distanza reciproca fra i piani reticolari. Naturalmente i raggi riflessi non possono venire percepiti dall'occhio umano, bensí impressionare una lastra fotografica epperciò rendersi palesi. Lo strumento costruito a questo scopo si chiama « spettrometro a raggi X ». Esso misura gli angoli per i quali si ha la riflessione; dai dati cosí ottenuti si ricava anzitutto l'intervallo fra i piani reticolari ed in secondo luogo gli angoli fra i varii piani del cristallo. Per esempio si determinano non solo gli intervalli fra i piani AA, BB, ecc. (fig. 32 B) oppure PP, QQ, ecc., bensí anche l'angolo compreso fra i piani AA e PP, ecc. Insomma lo strumento dà le dimensioni e la forma della cellula elementare.

In generale la densità del cristallo è facilmente determinabile per via sperimentale ed allora possiamo calcolare il peso della sostanza contenuta nella cellula elementare. Essendo poi noto il peso d'una molecola, si giunge facilmente al numero di molecole che occupa la cellula; come già detto, questo numero è assai piccolo. Infine le osservazioni

allo spettrometro a raggi X dànno indicazioni sulla posizione rispettiva delle molecole costituenti l'unità cristallina.

La cosa piú importante che dobbiamo tenere presente è che i raggi X ci dànno la distanza fra un qualsiasi piano sul quale si trovano distribuiti i gruppi atomici ed il piano successivo esattamente identico al primo, e che perciò è occupato da una altra serie di gruppi atomici. Questa distanza od intervallo reticolare è esattamente identica alla distanza fra due opposte facce della cellula elementare. Possiamo disegnare la cellula elementare in varii modi, collegando vertici diversi del reticolo spaziale. Nel cristallo non sono soltanto misurabili tre intervalli, bensí un numero arbitrario qualsiasi; ma usualmente ci si accontenta di determinarne alcuni.

Vi sono dei casi nei quali l'analisi cristallina è stata spinta tanto oltre da poterne ricavare la posizione di ciascun atomo nella cellula elementare del cristallo. Un simile risultato non si può ottenere unicamente coi raggi X, bensí ricorrendo anche alla chimica ed alla fisica. Non ci fermeremo a descrivere ulteriori particolari per ciascun caso: la precedente esposizione generale può bastare per farsi un'idea dei metodi seguiti. Esporremo invece alcuni dei risultati ottenuti e che non sono privi d'interesse.

Incominciamo dal diamante, il principe dei cri-

stalli. Esso non è soltanto una gemma splendida e preziosa, bensí anche importante dal lato scientifico poiché la sua struttura chiarisce molte delle cose piú fondamentali della chimica, particolarmente di quella organica. Un solo atomo, quello di carbonio, prende parte alla costituzione del diamante, ma questo atomo è per noi di estremo interesse. Esso è il costituente fondamentale delle sostanze alimentari e combustibili, coloranti ed esplosive, del nostro stesso corpo e di molte altre cose. La struttura del diamante è assai semplice, ma, come tutte le costruzioni nello spazio, non facile da capire cosí su due piedi. Siamo cosí abituati a disegnare in un piano solo, la carta e la matita sono cosí comode da adoperarsi, che la nostra mente afferra facilmente i particolari di un disegno in piano. Ma non possiamo disegnare nello spazio; al massimo costruire dei modelli con molto lavoro e perditempo, epperciò la nostra capacità di concepire strutture a tre dimensioni è indebolita per mancanza di esercizio. Taluni possiedono il dono naturale di pensare in tre dimensioni, altri, che debbono occuparsi di cristallografia, vi sono allenati. Alla maggior parte di noi torna invece inizialmente assai difficile immaginarsi la distribuzione degli atomi e delle molecole nei cristalli. Tuttavia la struttura del diamante, mostrata a fig. A della tavola XIV, diventa subito chiara, se le si presta un poco d'at-

tenzione. Le palline nere rappresentano degli atomi di carbonio in riguardo alla loro reciproca posizione, non certo alla loro forma e grandezza, di cui sappiamo assai poco. Ogni atomo di carbonio occupa il centro di gravità (baricentro) di quattro altri; questi quattro si trovano nei vertici di una piramide a quattro facce detta tetraedro; l'atomo baricentrico è evidentemente alla stessa distanza da ciascuno degli altri quattro. Vi sono delle ragioni per ritenere che i legami fra gli atomi sieno assai tenaci e che esista una sola specie di legame in tutta la struttura del diamante. Questa semplicità e regolarità di struttura è certamente la causa per la quale il diamante si trova al vertice della scala delle durezze. Se viene premuto contro un qualsiasi altro cristallo, sono gli atomi di questo che debbono cedere e non quelli del diamante. Il diamante ha un piano di sfaldatura cioè di facile divisibilità; nella figura è quello della tavola su cui il modello appoggia; di questi piani di sfaldatura ve ne sono quattro, ciascuno parallelo ad una delle quattro facce del tetraedro. Si può girare il modello in modo da farlo appoggiare su una qualsiasi delle altre tre facce e sempre assume lo stesso aspetto in ciascuna posizione. La distanza fra i centri di due atomi di carbonio adiacenti è di 1,54 unità Angström; questa unità è eguale alla centomilionesima parte di un centimetro. È poi comprensibile che il piano di sfal-

datura sia nella figura A di tavola XIV parallelo al piano del tavolo, poiché esso taglia ortogonalmente in due i legami verticali fra gli strati orizzontali occupati dagli atomi. Ciascuno di questi strati si può considerare come un reticolato a maglie esagone leggermente ondulato. Il cristallo si può ovviamente considerare composto da tanti strati atomici paralleli a ciascuna delle quattro facce del tetraedro e non soltanto a quella che forma la base del modello in figura A.

L'esistenza di questi piani di sfaldatura è naturalmente ben nota ai lapidarii, i quali ne approfittano per risparmiarsi molto lavoro. Nella Torre di Londra sono conservati gli utensili che servirono a tagliare il famoso diamante Cullinan. La fig. A della tavola XV mostra il diamante diviso in tre pezzi e la fig. B gli utensili adoperati per il taglio. Il diamante si lascia anche sfaldare secondo un altro ordine di piani ma l'operazione è difficile e raramente eseguita.

Se consideriamo l'architettura del diamante non ci può sfuggire che in ogni parte del modello gli atomi di carbonio sono disposti secondo anelli esagonali. Se isoliamo uno di questi anelli dal modello vediamo ch'esso ha l'aspetto rappresentato in fig. B 2 della tavola XVI: un perfetto esagono se visto dall'alto, ma con i vertici non situati in un unico piano.

Ora l'anello di sei atomi di carbonio è già da tempo un simbolo famoso della chimica organica. Nessuno ha mai visto quest'anello: è troppo piccolo. Ma il chimico ne ha dimostrata l'esistenza con argomentazioni quanto mai ingegnose ed interessanti. Anche chi non è un chimico può giungere a capirle, almeno in parte, senza grande difficoltà. Per esempio già verso la metà del secolo scorso si sapeva che lo scheletro di certune molecole era costituito da atomi di carbonio disposti in serie o catena e che degli atomi d'idrogeno potevano unirsi ai vari atomi di carbonio in modo che ciascuno di questi risultasse collegato con quattro altri atomi (come ad esempio in fig. 34). In queste condizioni la molecola non poteva assorbire altri atomi di idrogeno, era cioè, come si dice, «saturata», poiché un singolo atomo di carbonio è « saturato » quando è connesso ad altri atomi con tutti i suoi legami, che sono quattro; abbiamo un esempio di questo fatto nel gas delle paludi o metano (CH_4) ove un atomo di carbonio è unito a quattro atomi di idrogeno. Il numero relativo di atomi di carbonio ed idrogeno della molecola era esattamente quello che dovevasi attendere in base a questa ipotesi. Con sei atomi di carbonio, quelli di idrogeno dovevano esser quat-

```
    H   H   H   H   H   H
    |   |   |   |   |   |
H — C — C — C — C — C — C — H
    |   |   |   |   |   |
    H   H   H   H   H   H
```

FIG. 34. Una molecola d'esano.

tordici come è visibile nella citata figura 34, e ciò è stato effettivamente confermato dall'esperienza. Le sostanze le cui molecole hanno tale costituzione a catena si chiamano paraffine (vedasi verso la fine del capitolo seguente); i singoli membri del gruppo delle paraffine hanno una catena di diversa lunghezza, cioè composta di un diverso numero di atomi di carbonio. Nel caso particolare della fig. 34 la sostanza si chiama esano.

Ora nel 1825 Faraday scoprí nel liquido formantesi nella compressione del gas illuminante una sostanza che oggi è nota col nome di benzene o benzolo. Alcune gocce del primo preparato di Faraday vengono conservate come cimelio storico nella «Royal Institution» di Londra. La molecola di questa sostanza è costituita da sei atomi di carbonio, come l'esano, e da sei atomi di idrogeno. Si può indurla ad accogliere altri sei atomi di idrogeno, di modo che questi diventano in tutto dodici, ma non di piú. La nuova molecola con dodici atomi di idrogeno è abbastanza analoga a quella dell'esano in quanto a comportamento chimico, ma non può avere la stessa struttura di quest'ultima, poiché ha due atomi d'idrogeno in meno. L'enigma venne risolto nel 1867 da Kekulé, il quale suggerí l'ipotesi che lo scheletro della molecola del benzene non fosse una catena, bensí un anello formato da sei atomi di carbonio; possiamo immaginarci quest'anello deriva-

Fig. A - Il diamante Cullinan diviso in tre pezzi.
Originariamente era grande quanto il pugno di un bambino.

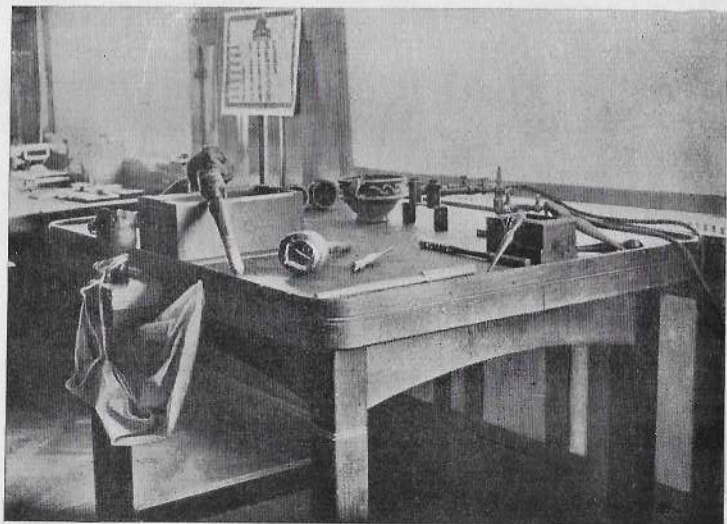
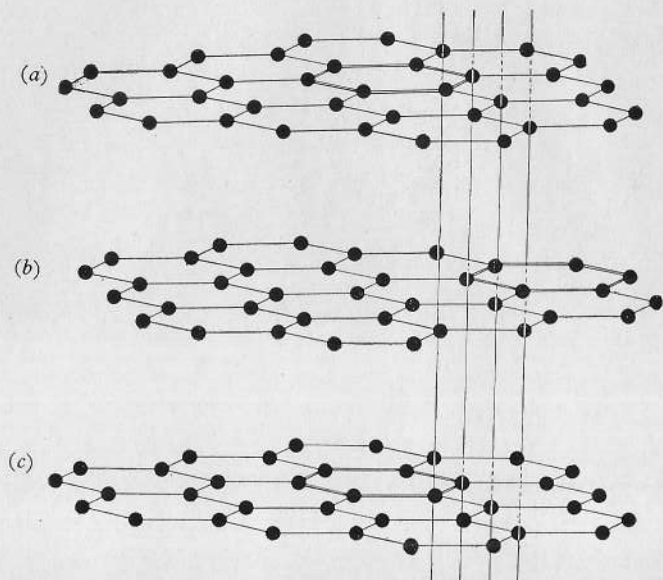
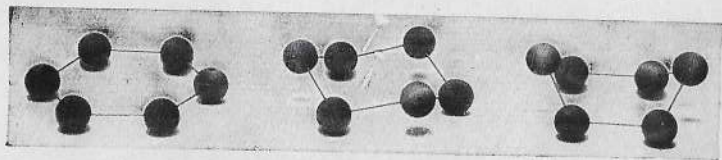



Fig B. Tavola ed utensili per tagliare il diamante.

TAVOLA XVI.

A. Gli strati atomici del cristallo di grafite.

(*a*) e (*c*) sono identici sotto ogni rapporto; (*b*) coincide con (*a*) se girato di 180° nel proprio piano intorno ad una qualsiasi delle linee verticali segnate nella figura.

B. Possibili forme dell'anello benzenico.

1. Anello piano. 2. e 3. Anelli ondulati (v. pag. 149).
Senza indicazioni d'atomi d'idrogeno.

re dalla catena della fig. 34 per abolizione dei due atomi estremi d'idrogeno e chiusura della catena su se stessa come è mostrato in fig. 35 [1]. Il nome chimico di quest'ultima sostanza è esaidrobenzene o esametilene. Il benzene ha invece un solo atomo d'idrogeno legato ad ogni vertice dell'esagono. La catena e l'anello d'atomi di carbonio sono alla base delle due grandi serie in cui si dividono le sostanze organiche: quella dei derivati del carbonio a catene aperte e quella dei derivati del carbonio a catene chiuse od anelli. Molecole a catena si trovano non solo nelle paraffine, ma nei grassi, olii, saponi e molti altri gruppi di sostanze. L'anello è invece caratteristico di molte migliaia di note molecole, comprese quelle dei colori ed esplosivi, di medicinali come il chinino, la saccarina e cosí via.

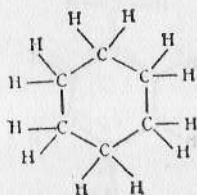



FIG. 35. Una molecola di esaidrobenzene.

Il concetto dell'anello esagonale chiuso offre senz'altro una spiegazione semplice ed elegante di un buon numero di importanti fatti chimici, di cui porteremo ora un esempio. La molecola del benzene consta di un anello esagonale di atomi di carbonio con un atomo di idrogeno ad ogni vertice

(1) Nelle fig. 35 e seg. si è tralasciato di segnare, per semplicità, i doppi legami esistenti fra gli atomi di carbonio.

dell'esagono. Ciascun atomo di carbonio è legato soltanto a tre atomi: può perciò annettersi ancora un atomo, in modo che in totale vi è ancora posto per sei ulteriori atomi o gruppi atomici che la molecola di benzene può legare ai suoi vertici e cosí infatti si verifica in pratica. La molecola di benzene può tuttavia esistere tranquillamente senza di essi. I chimici hanno inoltre scoperto che, senza per altro modificare la molecola di benzene, si può alterarne la costituzione levandole uno o piú atomi d'idrogeno e sostituendoli con altri atomi o gruppi atomici. In un importante e noto caso l'atomo di idrogeno rimosso viene sostituito da un gruppo consistente in un atomo di carbonio e tre d'idrogeno, gruppo noto col nome di metilico. La nuova molecola ha la struttura mostrata dalla fig. 36 ed è nota col nome di toluene, sostanza molto importante, liquida alla temperatura ordinaria. Si può sottrarre all'anello un altro atomo di idrogeno e rimpiazzarlo, supponiamo, con uno di bromo; la nuova sostanza si chiama bromotoluene. Ora è sorprendente che con questa sostituzione si ottengano tre diverse sostanze, aventi tutte la stessa composizione, cioè lo stesso nucleo di sei atomi di carbonio, quattro atomi di idrogeno, uno di bromo ed un

FIG. 36. Una molecola di toluene.

gruppo metilico che possiamo presumere rimanga intatto. Come è possibile spiegare l'esistenza di queste tre sostanze di identica composizione ma dotate di proprietà differenti? La teoria dell'anello di Kekulé ci dà subito la risposta: vi sono tre modi, e non piú di tre, per operare la sostituzione di un atomo di idrogeno, come è visibile in fig. 37. L'atomo di bromo può trovarsi vicino al gruppo

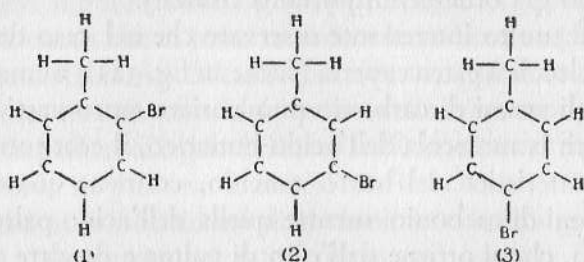



FIG. 37. Bromotoluene: (1) orto, (2) meta, (3) para.

metilico, oppure di un posto piú lontano o, infine, di due.

Le tre molecole che ne risultano hanno una diversa conformazione, perciò è prevedibile che presentino anche delle proprietà differenti. E non vi è dubbio che le tre sostanze esistano realmente; anzi i chimici sono riusciti persino a stabilire quale delle tre conformazioni molecolari spetta a ciascuna di esse. Molti altri esempi si potrebbero ancora citare, ma questo basterà per illustrare l'importanza che vicino alla composizione ha la conformazione molecolare, poi-

ché le tre molecole precedenti differiscono soltanto nella posizione rispettiva delle due sostituzioni. I metodi d'analisi coi raggi X sono specialmente adatti ad investigare queste differenze, poiché si può col loro mezzo determinare le dimensioni della cellula elementare nella quale sono agglomerate due o piú molecole e riconoscere le conseguenze d'una alterazione della « forma » molecolare. Per questa via si sono già ottenuti importanti risultati.

È molto interessante osservare che nel caso delle molecole a catena aperta (come in fig. 34) il numero degli atomi di carbonio può variare entro vasti limiti; la molecola dell'acido butirrico, il costituente caratteristico del burro rancido, contiene quattro atomi di carbonio, mentre quella dell'acido palmitico, che si ottiene dall'olio di palma e da altre sostanze, ne contiene sedici (vedasi alla fine del capitolo seguente). D'altro canto la molecola ad anello di sei atomi di carbonio si presenta assai piú frequentemente che qualsiasi altra. Dev'essere la piú facile a formarsi e la piú solida di costruzione. Ora il diamante, l'unico cristallo, ad eccezione della grafite, che consista di soli atomi di carbonio, è interamente costituito da anelli esagonali. È perciò naturale supporre che nella struttura del diamante si nasconda la ragione dell'esistenza dell'anello di sei atomi. Questa struttura deriva dal semplice principio che ogni atomo di carbonio è circondato da altri quat-

tro atomi di carbonio simmetricamente disposti intorno al primo (fig. A, tav. XIV). I due segmenti di retta che collegano un atomo di carbonio a due atomi vicini comprendono tra loro un angolo che fu facilmente calcolato in 109 gradi e 28 minuti di grado. Se in determinate circostanze esiste la regola che il collegamento di un atomo di carbonio con due altri debba sempre avvenire in modo da rispettare quest'angolo (vedasi fig. 50, pag. 204), allora l'anello piú corto che si possa chiudere è quello comprendente sei atomi di carbonio. (Per maggior intelligenza si può costruire un modello ricorrendo a delle palline di legno di forma sufficientemente regolare: se ne possono avere quante se ne vuole rivolgendosi ai fabbricanti di bottoni. In ciascuna pallina si praticano nei punti opportuni quattro fori, stabilendo i legami con puntine da grammofono. Si possono allora costruire modelli di diamante e molte configurazioni di catene e anelli molecolari.)

Cinque atomi di carbonio in un piano formano approssimativamente un anello poiché l'angolo ai vertici di un pentagono regolare è di 108 gradi. Ma se quest'angolo dev'essere di 109°, 28' è necessario ricorrere a sei atomi dando loro una disposizione ondulata come in fig. B 2 in tavola XVI. Non si può ancora affermare con sicurezza se l'anello benzenico sia realmente gibboso in ogni circostanza, o qualche volta piano, nel qual caso l'angolo diventa

di 120° (fig. B 1 tav. XVI) oppure abbia l'aspetto mostrato nella fig. B 3 della tav. XVI. Le evidenze sperimentali s'accumulano, ma non sono ancora sufficienti per decidere su questa particolare questione; può darsi che si verifichino tutte e tre le forme indicate. Nel corso delle ricerche si misero comunque in luce molti fatti che sono ormai accertati ed assai interessanti.

Analogamente al diamante, la sostanza chiamata grafite è costituita unicamente da atomi di carbonio; ma ne è piú leggera, poiché il suo peso specifico è di circa 2,30, mentre quello del diamante è di 3,52. Ovviamente gli atomi di carbonio hanno assunto una disposizione diversa nella quale le loro reciproche distanze sono in media notevolmente cresciute. I raggi X mostrano che questo accrescimento ha avuto luogo in una sola direzione. Anche nella grafite gli atomi sono disposti a strati come nel diamante (fig. A tav. XVI). Visto dall'alto ogni strato offre lo stesso aspetto d'un reticolo a maglie esagonali e per di piú il lato dell'esagono è quasi esattamente della stessa lunghezza che nel caso del diamante. Invece l'intervallo fra strato e strato è notevolmente aumentato ed ecco perché la sostanza è piú leggera. Sembra però che gli strati si sieno appiattiti in modo che ogni atomo di carbonio è ora circondato da tre altri atomi nel suo proprio piano. Se anche i legami fra gli atomi di uno stesso strato

vennero alterati, ciò non vuol dire ch'essi sieno anche stati allentati; per contro i legami fra strato e strato si sono fortemente indeboliti. Per questa ragione gli strati scorrono molto facilmente l'uno sull'altro pur conservando ciascuno la propria tenacità. L'esistenza di queste due condizioni conferisce alla grafite le sue buone proprietà come lubrificante; non soltanto è importante da questo punto di vista la facilità di scorrimento degli strati, ma anche il fatto che questi ultimi non si polverizzino facilmente. Se si scivola sulla pietra del focolare annerita con piombaggine, alcuni degli strati atomici di grafite rimangono aderenti alla pietra, mentre altri aderiscono alla suola della scarpa; sono questi gli strati che scorrono gli uni sugli altri. È meraviglioso come una sola variazione — la cui vera natura rimane ad ogni modo un mistero — riesca a convertire una sostanza, ritenuta il prototipo di durezza, in un'altra che rappresenta il miglior mezzo lubrificante a nostra disposizione.

Un'altra serie di fatti conferma parimenti l'ipotesi che l'anello è una cosa reale avente dimensioni ammissibili e misurabili: essa risulta dal confronto di due cristalli, naftalina ed antracene. Queste due sostanze sono di grandissima importanza nell'industria dei coloranti, la prima essendo adoperata nella fabbricazione dell'indaco, la seconda entrando in quella dell'alizarina, il costituente attivo della robbia.

La naftalina è una sostanza comune; tutti la conosceranno sotto forma di quelle bianche ed aromatiche palline che le massaie pongono nei cassetti e negli armadi contro le tarme. Sciogliendo della naftalina nell'etere e lasciando lentamente evaporare il solvente, si ottengono facilmente dei cristalli di naftalina. In generale somigliano a quelli visibili in figura D tav. XIII.

FIG. 38. Molecole di naftalina $C_{10}H_8$ e di antracene $C_{14}H_{10}$.

Secondo il chimico la naftalina consiste di un doppio anello benzenico come in fig. 38 A; l'antracene invece di un triplice anello come in fig. 38 B. Sottoponendo i cristalli delle due sostanze all'analisi coi raggi X, si trova che l'unità cristallina è costituita da due molecole e che la forma della cellula che contiene l'unità cristallina è quella mostrata in fig. 39. Le dimensioni delle cellule sono riportate alla base delle figure. Se si confrontano tra di loro queste due cellule è degno di nota che, lungo due spigoli, esse hanno quasi la stessa grandezza mentre esiste una

notevole differenza riguardo al terzo spigolo. È istintivo dedurne che i doppi anelli dell'un cristallo ed i tripli anelli dell'altro giacciono paralleli allo spigolo OC e che la differenza fra 11,18 e 8,69 è da ascriversi alla differente lunghezza delle due molecole. L'antracene contiene un anello in piú della naftalina, il che gli conferisce l'eccedenza 2,49 in lun-

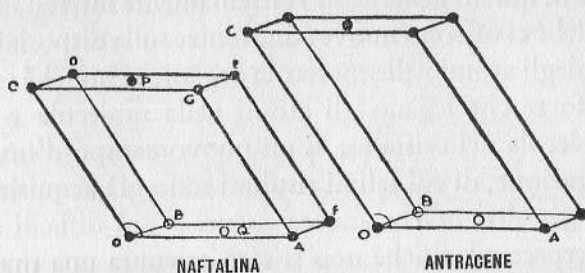



FIG. 39. Cellule elementari di naftalina ed antracene, disegnate nella stessa scala.

	OA	OB	OC	
Naftalina	8,34	6,05	8,69	In unità Angström:
Antracene	8,58	6,02	11,18	vedasi pag. 145.

ghezza. Se ora misuriamo il diametro dell'anello, quale si presenta nel diamante, troviamo ch'esso è di 2,50. Ciò che conferma ulteriormente l'ipotesi che l'anello ha una forma definita e dimensioni quasi costanti. Questa constatazione ci può servire di guida quando si tratta di stabilire la struttura di un cristallo di cui fa parte l'anello. I raggi X ci svelano la forma e le dimensioni della cellula elementare, ci dicono quante molecole contiene e ci dànno anche

qualche informazione sulla loro reciproca posizione nella cellula. Conoscendo con sufficiente precisione la grandezza dell'anello o degli anelli che fanno parte della molecola, abbiamo acquisito un punto di partenza nell'investigazione della struttura, poiché sappiamo che corpi di determinate dimensioni debbono entrare in cellule di determinata forma. Ricerche di questo genere sono estremamente interessanti, poiché ci offrono nuove conoscenze sulla disposizione degli atomi nelle molecole organiche nonché sulle forze che legano gli atomi nella molecola e la molecola nel cristallo. È un nuovo campo d'investigazione, di cui taluni risultati sono già acquisiti e chiari, altri invece ancora oscuri e piú difficili ad interpretarsi, finché non si sarà ottenuta una maggior copia di dati sperimentali.

Per quanto finora ci consta, la molecola organica è un complesso rigido e leggero, le cui parti sono sposate insieme tenacemente ma debolmente connesse con le molecole adiacenti nei cristalli. Le sostanze organiche sono press'a poco tutte leggere, non molto piú pesanti dell'acqua. Il fatto che il peso specifico della naftalina è solo 1,15 tradisce la lacunosità della sua struttura. Persino il diamante è pieno di vuoti come una spugna. Se questi vuoti fossero riempiti con altri atomi di carbonio, il peso specifico del diamante diverrebbe doppio, poiché ogni vuoto è precisamente grande abbastanza da accogliere un altro

atomo di carbonio e perché ci sono tanti posti vuoti quanti sono gli atomi di carbonio del diamante stesso.

La debolezza dei legami che congiungono molecola a molecola è la ragione per cui i cristalli organici sono cosí molli e di cosí facile fusione. Per la stessa

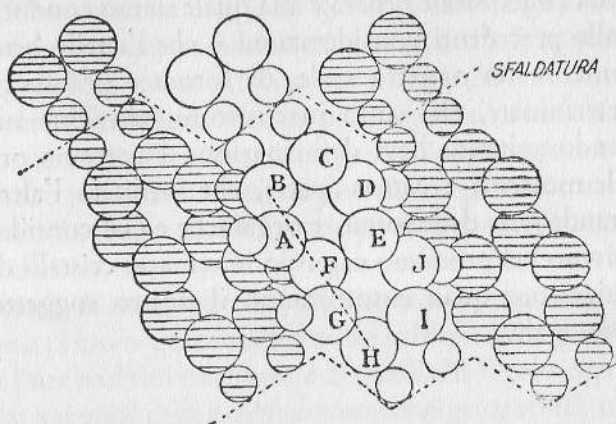



FIG. 40. Struttura della naftalina: i cerchi grandi rappresentano atomi di carbonio, quelli piú piccoli atomi di idrogeno; una molecola di naftalina contiene dieci atomi di carbonio (A-J) ed otto di idrogeno. Qui si vedono tre molecole complete; in alto parte di altre molecole.

ragione la naftalina « sublima », passa cioè direttamente dallo stato solido ad aeriforme, evaporando. Intere molecole si distaccano dalla massa solida formando un vapore che può di nuovo cristallizzarsi in punti piú freddi del recipiente che lo contiene.

La naftalina e l'antracene hanno una struttura scagliosa: esse sono, come si usa dire, facilmente sfal-

dabili. Questa sfaldabilità ha luogo lungo la spezzata punteggiata in fig. 40; evidentemente le molecole si distaccano l'una dall'altra piú facilmente ai loro estremi che lungo i loro lati. In ogni scaglia le molecole sono quasi in piedi, come culmi di grano piegati dal vento.

La conclusione generale alla quale siamo condotti dalle precedenti considerazioni è che l'anello benzenico è un oggetto reale, di forma e grandezza determinate, che entra in strutture cristalline subendo soltanto lievi deformazioni. Passeremo ora alle molecole a catena aperta, che formano l'altra grande serie delle sostanze organiche e che considereremo nel prossimo capitolo insieme ai cristalli di ghiaccio, i quali costituiranno il nostro soggetto principale.

Capitolo Quinto

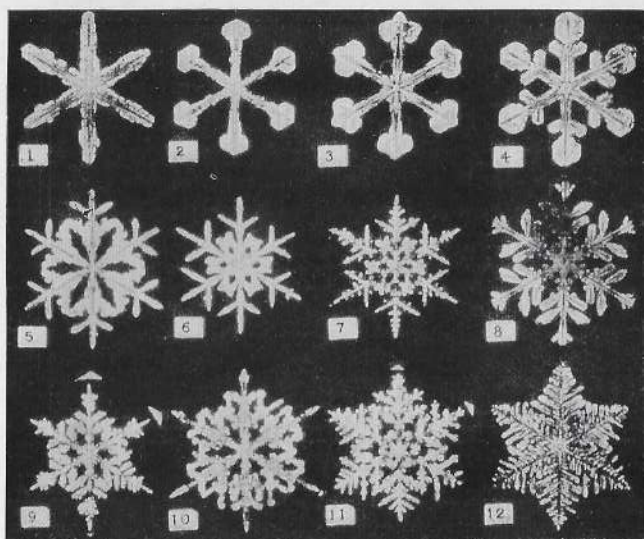
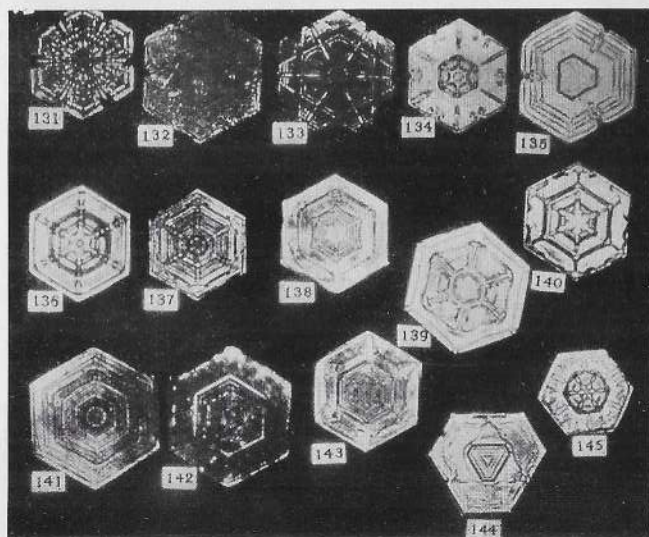
LA NATURA DEI CRISTALLI: GHIACCIO E NEVE

Se ci guardiamo d'attorno in cerca di cristalli da esaminare ai raggi X, quelli di neve e ghiaccio colpiscono per primi la nostra attenzione. L'acqua è una delle sostanze piú comuni e note sulla terra: essa interessa la nostra vita in mille modi e tutte le sue forme hanno perciò per noi grande importanza. Ma anche per curiosità scientifica siamo indotti a studiare la struttura edificata con una molecola cosí semplice come quella dell'acqua, in cui entra un solo atomo di ossigeno e due d'idrogeno. A questa indagine ci incita pure la bellezza dei cristalli di neve, dalle linee cosí fini e delicate, e di quelli che il gelo deposita sui vetri delle nostre finestre cosí graziosi ed originali nel loro aspetto. È vero che i blocchi provenienti dalle fabbriche di ghiaccio non brillano per bellezza di forme, benché sia curioso vederli scivolare con facilità sul pavimento in seguito ad una spinta. Egli è che la fabbricazione del ghiaccio commerciale è troppo rapida, per cui quest'ultimo non ha il tempo di sviluppare le sue forme caratteristiche; la struttura cristallina esiste lo stesso ma il blocco consta di una infinità d'invisibili cristallini orientati in ogni direzione ed è pieno di bolle e straterelli d'aria.

Se desideriamo ammirare ciò che la natura è capace di fare quando le si lascia la libertà di agire in pace, dobbiamo esaminare i fiocchi di neve che cadono in un rigido giorno invernale. A ciò i nostri climi non sono abbastanza freddi: bisogna andare molto al nord. Degli osservatori, per esempio svedesi od americani, hanno fornito molti e bellissimi disegni di cristalli di neve, che si trovano sparsi in svariate pubblicazioni di fisica e meteorologia. Taluni di essi sono riprodotti nelle tavole XVII e XVIII.

Possiamo immaginarci come crescono i fiocchi di neve. Su in alto nell'atmosfera si associano due o tre molecole d'acqua; ad una ad una altre si aggiungono al cristallo nascente mentre cade, completandone man mano i fini particolari, finché la stella di neve a sei raggi giunge al suolo. Se il tempo è freddo il fiocco può continuare a crescere nello stesso modo ed il cristallo sviluppa piccole perfette facce che brillano al sole come diamanti. Nella prima fase della sua crescita il cristallo di neve è sovente ramificato; i suoi sei bracci s'allungano ed altri piú piccoli si innestano su di essi a destra e sinistra, da cui si staccano a loro volta bracci minori e cosí via; tutti i bracci sono tra loro connessi sotto un angolo di 60°, di modo che l'insieme assomiglia ad una stella a sei raggi di un finissimo pizzo. Questa forma ramificata è peculiare dei primi stadii di cristallizzazione e sembra sia la conseguenza di un rapido ed

TAVOLA XVII

A

B

Cristalli di neve di varia forma.
(Dalla «*Monthly Weather Review*», U. S. A.)

A

B

C

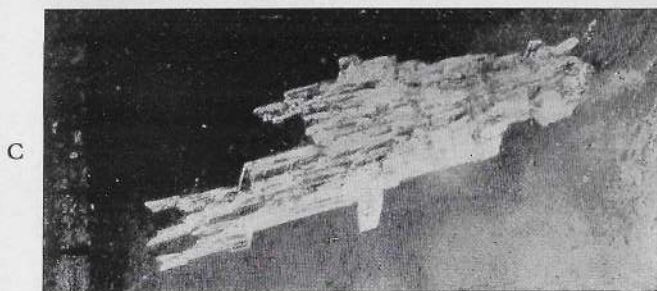
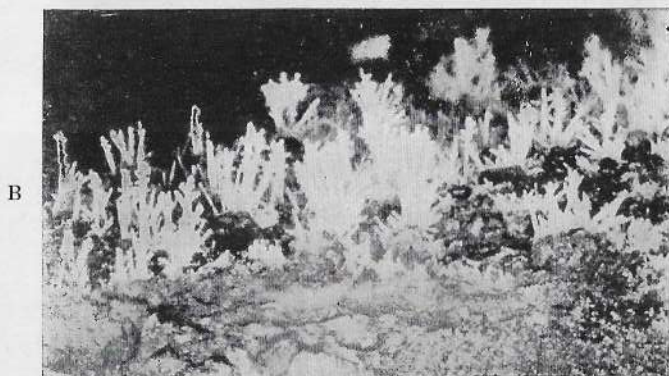
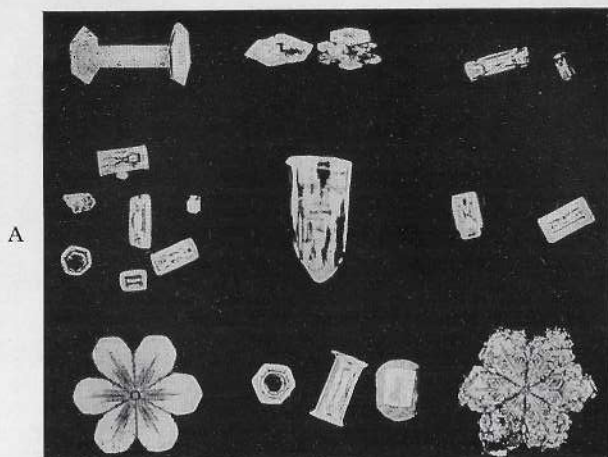



FIG. A. Cristalli di neve (Dal «*Monthly Weather Bureau*», U. S. A.)
FIG. B. Fiori di neve cresciuti su distese di ghiaccio.
FIG. C. Fascio di prismi irregolari di ghiaccio.
(B. e C. da «*The British Antarctic Expedition, 1910-1913*).

improvviso congelamento. I bracci crescono partendo dal centro, poiché hanno utilizzato le molecole piú vicine e pronte a partecipare alla costituzione del cristallo e debbono estendersi in nuovi campi. Questo fenomeno si verifica anche in altri casi di rapida cristallizzazione; un esempio notevole è dato dalla formazione degli scheletri cristallini di ferro durante il suo raffreddamento in un crogiolo di fusione. Se si desidera conservarli occorre versar via al momento giusto il metallo ancora liquido prima che i cristalli abbiano avuto il tempo di riempire gli spazi vuoti. Queste figure di cristallizzazione si chiamano « dendriti » poiché somigliano un po' a degli alberi con tronco, rami grossi e sottili; ma l'angolo sotto il quale s'innestano l'uno sull'altro i rami del cristallo di ferro è retto, non di 60°, e la forma del cristallo non è cosí graziosa come quella del ghiaccio.

Quando la stella di neve ha avuto tempo di crescere ed ha trovato a sua disposizione una quantità sufficiente di molecole, i vuoti si colmano ed il cristallo diventa un disco esagonale (fig. B in tav. XVII). Si suppone che talora questi cristalli crescano a guisa di dischi fin dall'inizio. Strano a dirsi, due dischi sono sovente connessi insieme da una colonna esagonale; un disco è generalmente piú largo dell'altro e l'insieme somiglia ad un minuscolo e grazioso tavolino da tè (fig. A in tav. XVIII).

La colonna prismatica si ritrova anche nelle curiose formazioni della fig. C in tav. XVIII, che è stata presa dalla *Glaciology* di Wright e Priestley (British Antarctic Expedition, 1910-1913).

Prismi, dischi e « tavolini da tè » sono ritenuti la causa dei parelii e degli aloni, che si possono osservare alle alte latitudini (tav. XIX).

L'esagono in fig. 41 rappresenti la sezione di uno di questi prismi o dischi e sia ABCD il percorso di un raggio di luce che lo attraversi. Il raggio viene rifratto nei punti B e C; epperciò il raggio risulta deviato in totale d'almeno 21° 50', che è, in linguaggio fisico, l'angolo di minima deviazione.

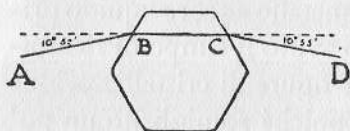
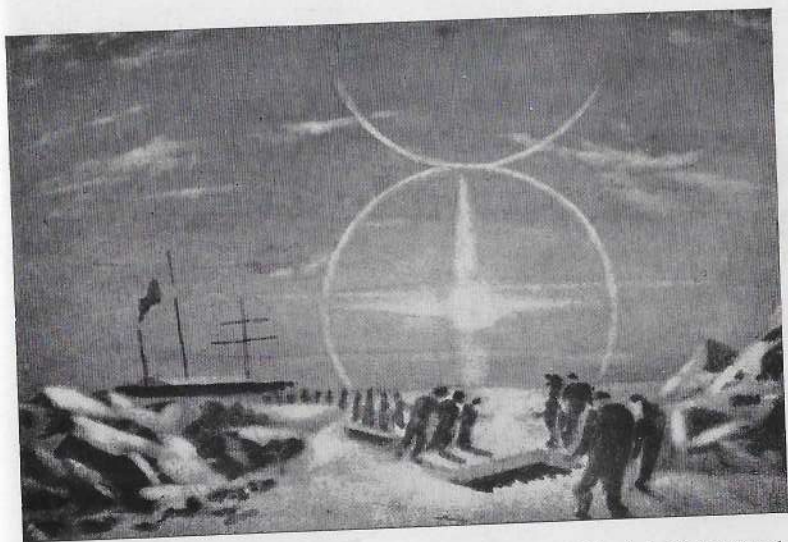
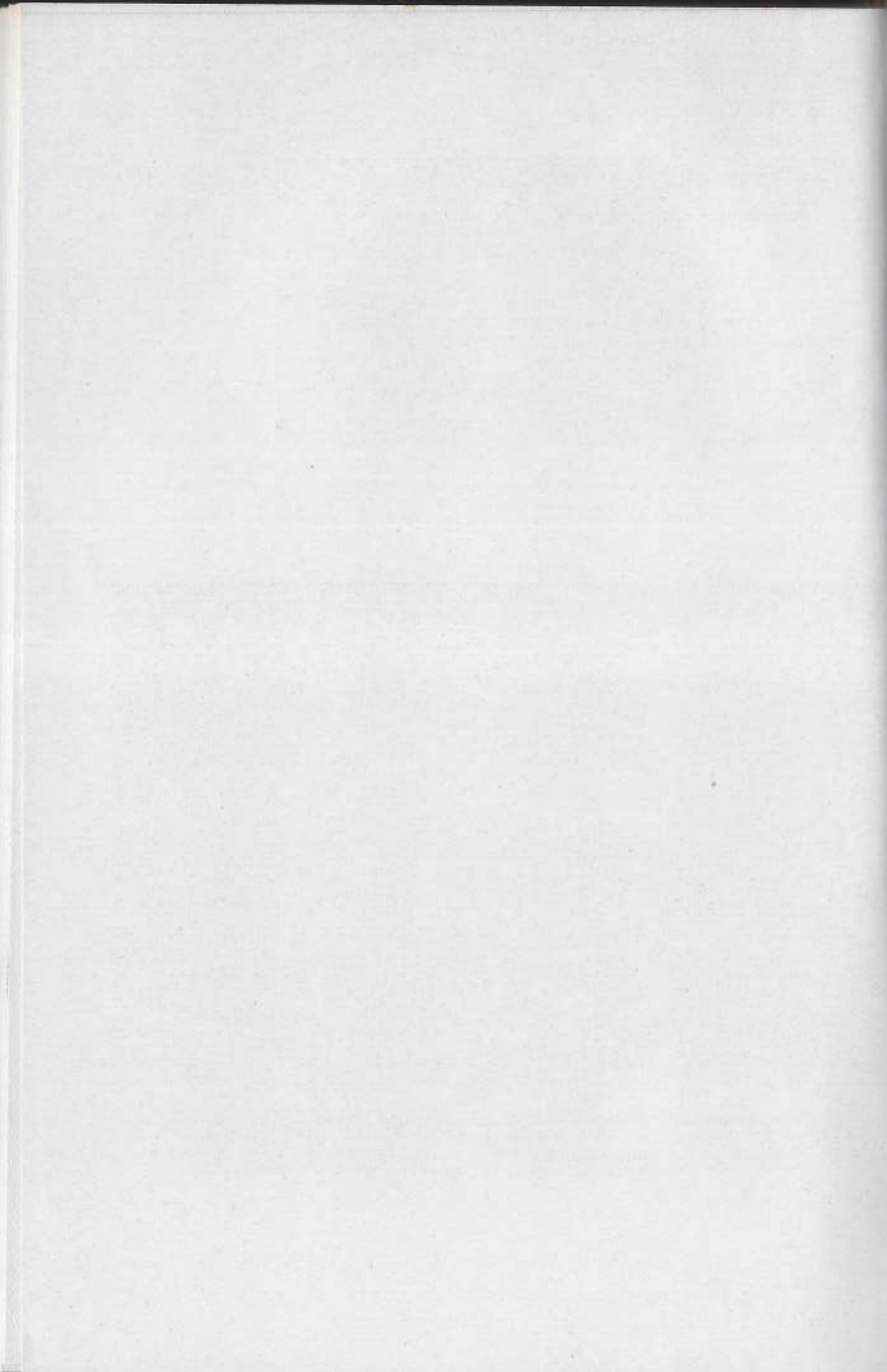



FIG. 41. L'esagono rappresenta una sezione ingrandita di un prisma di ghiaccio. ABCD è il cammino di un raggio di luce che lo attraversa.

Sia ora (fig. 42) S una sorgente luminosa ed E l'occhio; un raggio che parte da S viene rifratto passando per P e colpisce l'occhio in E se P è in posizione appropriata. Nella fig. 42 il prisma P è disposto simmetricamente, nel qual caso è noto che la deviazione SPE assume il suo valore minimo. Ogni prisma situato fra SPE e SP'E, come per esempio P_0, devia il raggio in direzione tale da non poter venire raccolto dall'occhio, comunque il prisma sia orientato. L'occhio non può ricevere un raggio rifratto da un simile prisma. Invece un prisma P_1 può invia-

TAVOLA XIX.

La figura superiore è una fotografia di G. A. Clarke, ed è stata tolta dall'articolo di F. J. Wipple sull'Ottica meteorologica nel «*Dictionary of Applied Physics*», Volume III, pag. 529. Essa mostra degli aloni e dei parelii. La seconda figura è un interessante schizzo a mano posseduto dalla «Royal Institution»: si tratta di un alone con colonne solari.

re della luce nell'occhio quando ha una posizione asimmetrica, come in figura; l'angolo di deviazione dev'essere maggiore di quello minimo ed ecco perché il prisma deve venire orientato di sghembo. Perciò un osservatore situato in E e volto verso il sole S vede della luce arrivare dalle direzioni PE e P'E

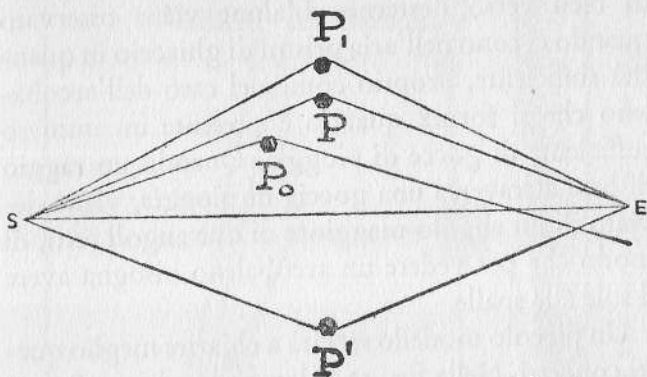



FIG. 42. Come si forma un alone. Vedasi nel testo per la descrizione.

e da altri punti al di là di P e P'. Ma la luce proveniente da questi altri punti è relativamente debole, poiché la maggior parte delle deviazioni non è lontana dal valore minimo; in altre parole: quanto piú se ne discostano tanto meno numerose sono. Da entro PEP' non proviene luce, epperciò l'intensa luce della deviazione minima ne risulta piú nettamente definita.

Queste considerazioni valgono per raggi di luce provenienti da tutte le direzioni intorno al sole;

per cui l'effetto complessivo è che l'osservatore vede un anello intorno al sole, nettamente limitato verso l'interno e dal contorno sfumato verso l'esterno. Per della luce rossa l'angolo PEP' è un po' minore che per quella bleu, perciò l'alone non è tutto bianco, bensí colorato di rosso verso l'interno, di bleu verso l'esterno. L'alone viene osservato quando ci sono nell'aria prismi di ghiaccio in quantità sufficiente, proprio come nel caso dell'arcobaleno che si forma quando è presente un numero sufficiente di gocce di pioggia. Quando un raggio di luce attraversa una goccia di pioggia, viene deviato di un angolo maggiore di due angoli retti, di modo che per vedere un arcobaleno bisogna avere il sole alle spalle.

Un piccolo modello servirà a chiarire meglio questi concetti. Nella fig. 43 la lampada ad arco S rappresenti il sole; in E ci sia l'occhio. Fra S ed E un sostegno J regga un prisma di vetro. Le dimensioni del modello sono state scelte in modo che un raggio uscente da S e rifratto dal prisma cada in E. Se il braccio che regge il prisma ruota in un piano verticale intorno ad J, l'occhio continua ad essere illuminato. Se l'intero cerchio descritto dal prisma fosse occupato da tanti prismi, l'occhio vedrebbe un alone intorno alla macchia luminosa centrale.

Se per una ragione qualsiasi i prismi tendessero ad assumere solo determinate posizioni, l'alone sarebbe

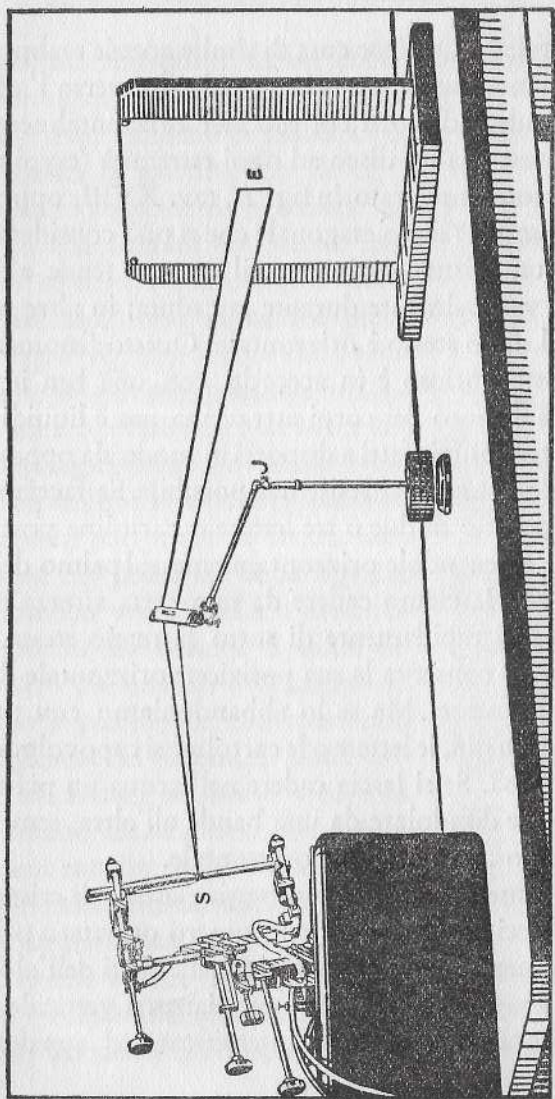



FIG. 43. Modello che dimostra la formazione degli aloni. S J E sono punti situati su una stessa retta. La spiegazione è nel testo.

incompleto. Qualche cosa di simile accade realmente. Quando un lungo prisma cade attraverso l'aria, esso tende a disporsi col suo asse orizzontalmente. Se ha tuttavia un disco ad ogni estremità (tavolino da tè) come mostrato in fig. A, tav. XVIII, oppure è un semplice disco esagonale che si può considerare come un prisma assai corto, il suo asse tende a disporsi verticalmente durante la caduta; in altre parole, il disco stesso è orizzontale. Questo fenomeno piuttosto curioso è in accordo con una ben nota legge sul moto dei corpi attraverso gas e liquidi. I corpi tendono infatti a disporsi in modo da opporre al moto la massima resistenza possibile. Se facciamo un pacchetto di due o tre lettere o cartoline postali sciolte e, tenendole orizzontalmente sul palmo della mano, lo lasciamo cadere da una certa altezza togliendogli rapidamente di sotto la mano stessa, il pacchetto conserva la sua posizione orizzontale durante la caduta. Ma se lo abbandoniamo con uno spigolo in giú, le lettere o le cartoline si capovolgono senza posa. Se si lascia cadere nell'acqua un piatto, lo si vede dondolare da una banda all'altra, sempre tendendo alla posizione orizzontale.

Di conseguenza in una pioggia cadente di cristalli di ghiaccio ve n'è un gran numero orientato orizzontalmente e verticalmente. Quelle parti dell'alone che si trovano agli estremi dei diametri verticale ed orizzontale ne vengono intensificate ed appaiono

come macchie piú luminose del resto dell'anello: si suole allora parlare di parelii.

È facile mostrare la tendenza dei cristalli, aventi la forma di un tavolino da tè, a disporsi verticalmente mentre cadono. Facciamone dei piccoli modelli di ebanite e lasciamoli cadere in un alto vaso cilindrico pieno d'acqua (fig. 44). È bene che il recipiente sia piú alto possibile, ma già un mezzo metro d'acqua basta alla nostra esperienza. Lo strano è che taluni dei nostri modellini tendono a cadere col piatto in basso, altri invece col piatto in coda. Questo fenomeno venne studiato matematicamente da Besson, il quale dimostrò che quando il diametro del disco è piccolo in confronto alla lunghezza del prisma, il disco tende ad andare avanti e viceversa. Possiamo sincerarcene con l'esperienza: meglio tenere l'asse del cristallo orizzontalmente sott'acqua e poi lasciarlo andare.

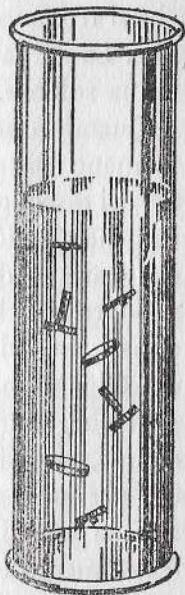



FIG. 44. Dischi e prismi, taluni dei quali a disco terminale, cadono attraverso l'acqua, con che i dischi tendono a mantenersi orizzontali.

Sovente appare illuminato anche l'intero diametro verticale dell'alone, ma ciò per una ragione completamente diversa; questa illuminazione è in-

fatti dovuta alla riflessione dei raggi solari sulle superfici piane dei cristalli e dischi di neve. L'osservatore riceve riflessi solari da parte dei cristalli di neve situati ad ogni altitudine, però solo da quelli che si trovano in un piano verticale passante per il sole. La larga riga verticale viene chiamata « colonna solare ».

Quando uno specchio d'acqua gela all'aperto, si formano dei cristalli di ghiaccio simili a quelli di neve: dei dischi esagonali disposti di piatto sull'acqua. In generale ciò non è molto evidente, ma in libri che trattano di esplorazioni artiche si trovano riprodotti banchi di ghiaccio spezzati in colonne esagonali, come le colonne basaltiche della Massicciata dei Giganti nell'Irlanda settentrionale. Si afferma pure che, quando il ghiaccio ricoprente un lago si rompe, esso si divide dapprima in prismi verticali che per un certo tempo si sostengono l'un l'altro; appena però il ghiaccio comincia a muoversi, lo sfasciamento è rapido ed il lago subito si libera.

Nei resoconti degli esploratori antartici si ricorda particolarmente il fatto che il ghiaccio superficiale di laghi d'acqua dolce era stato trovato diviso in prismi esagonali disposti verticalmente. I piani di separazione erano riconoscibili da file di bollicine d'aria. Nell'acqua di mare, la formazione di cristalli di ghiaccio dava luogo all'espulsione del sale, che si raccoglieva nei vani fra i cristalli e ta-

lora veniva schizzato fuori alla superfice. I prismi erano quasi liberi da sale nell'interno e, se si facevano dapprima fondere gli strati superficiali, si otteneva dal resto, cioè dal loro nucleo, dell'acqua dolce abbastanza buona. I cristalli erano cosí limpidi che si potevano vedere attraverso di essi le rocce del fondo marino, come attraverso un tubo.

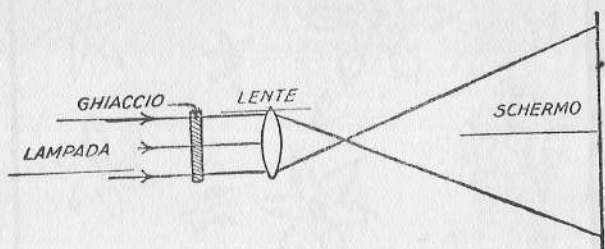



FIG. 45. Schizzo della disposizione mediante la quale si possono osservare i fiori di ghiaccio della fig. 45 A.

Un metodo assai ingegnoso per rendere visibile la struttura cristallina del ghiaccio è descritto dal Tyndall nel suo libro sul calore.

Una lastrina di ghiaccio trasparente viene fatta attraversare da un fascio di raggi luminosi provenienti da una lampada ad arco e la sua immagine proiettata per mezzo di una lente su uno schermo, come in fig. 45. Il calore della lampada disfa i cristalli in ordine inverso a quello seguito nella loro formazione. Incominciano ad apparire e crescere delle piccole cavità esagonali a sei raggi somiglianti a fiori con sei petali ed altre cavità somiglianti a

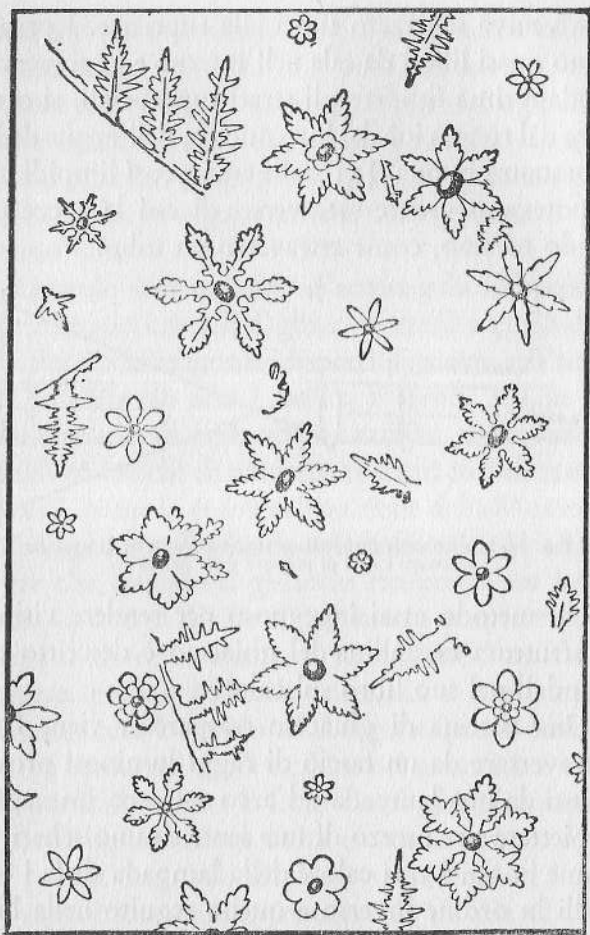



FIG. 45 A. Fiori di ghiaccio, da un disegno di Tyndall nella sua opera « Il calore ». La figura rappresenta un determinato stadio nella crescita dei fiori: dopo un certo tempo tutto lo schermo si ricopre di figure che si intersecano reciprocamente.

TAVOLA XX.

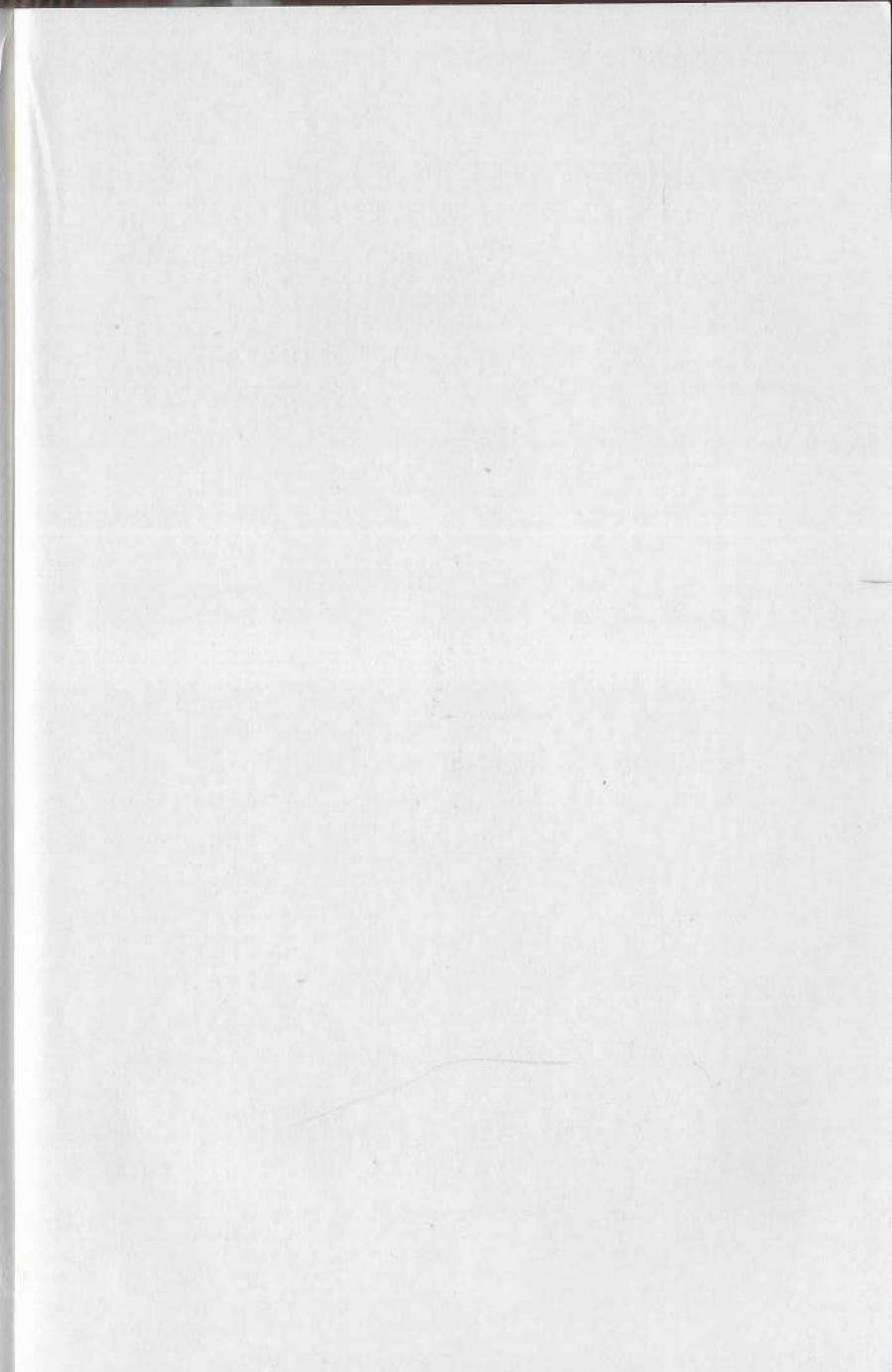
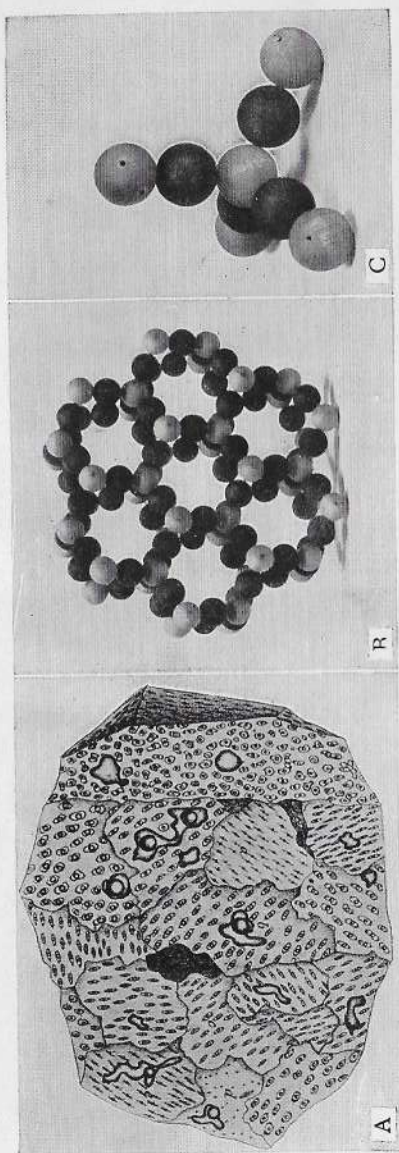



FIG. A. È dovuta ad Agassiz. Mostra che la massa del ghiacciaio è costituita da un insieme di blocchi che nella loro giacitura originaria mostravano i fiori di ghiaccio in un piano orizzontale. Saldati ora insieme alla rinfusa, i fiori di ghiaccio appaiono ora visti di sopra, di fianco ed in posizioni intermedie. FIG. B. Il modello è costituito da palline di due colori, le bianche rappresentando atomi d'ossigeno, le nere atomi d'idrogeno. FIG. C. Una porzione più piccola del modello di ghiaccio mostrante come s'aggruppano gli atomi d'ossigeno e d'idrogeno.

felci, le cui foglioline si diramano dal fusto sotto un angolo di 60°. Ben presto tutto lo schermo appare coperto da questi fiori di ghiaccio, quali vengono chiamati: l'aspetto è quello di un bassorilievo finemente intagliato. L'ordinario ghiaccio commerciale non dà quest'effetto; bisogna ricorrere a lastre di ghiaccio preparate in modo particolare e che sono abbastanza soddisfacenti. Ma il ghiaccio naturale che si forma all'aperto nelle notti gelide è assai piú adatto a questo scopo di qualsiasi altro ghiaccio fabbricato artificialmente; ottimi risultati dà il ghiaccio degli stagni: il che dimostra come sia essenziale ch'esso possa formarsi tranquillamente; forse occorre che l'acqua possa perdere gradualmente calore, come in una gelida e tranquilla notte invernale.

Al centro dei fiori di ghiaccio appare sovente una piccola macchia nera. Questo fenomeno attirò l'attenzione di Tyndall, che ne spiegò la causa. Quando il ghiaccio si scioglie, nel blocco si forma una cavità in seguito alla diminuzione di volume che subisce l'acqua quando passa dallo stato di ghiaccio a quello di liquido.

Forse l'acqua all'inizio occupa ancora, in uno stato di elevata tensione, lo stesso spazio occupato in precedenza come ghiaccio. Ma la tensione dev'essere estremamente grande, per cui l'acqua si stacca dal ghiaccio e si contrae al suo volume naturale. Ne

nasce un vuoto che agisce come una minuscola lente e diffonde la luce che vi incide. Da cui la macchia nera, la quale rivela che nessun raggio di luce attraversa in linea retta la cavità.

I fiori di ghiaccio si possono anche osservare sui ghiacciai, ove sono prodotti dal calore solare. Quando il ghiacciaio è alimentato da ghiacciai tributari oppure da blocchi di ghiaccio che vi cadono dentro dai fianchi, esso consta di un insieme di massi di ghiaccio saldati insieme dal gelo, ciascuno dei quali mostra dei fiori di ghiaccio. Dall'orientazione di questi fiori si riconosce in ogni caso qual era la giacitura primitiva del blocco, poiché i fiori si formarono in piani originariamente press'a poco orizzontali. Nella fig. A della tav. XX, tolta da una vecchia opera di Agassiz, la sezione d'un masso di ghiaccio proveniente da un ghiacciaio mostra chiaramente le varie orientazioni delle cavità: alcune si presentano dall'alto, altre di fianco, altre infine in una posizione intermedia.

Passiamo ora all'analisi della struttura cristallina del ghiaccio, come è stata resa possibile dall'applicazione dei raggi X. Ci regge la speranza di scoprire col loro mezzo la ragione della forma dei cristalli di ghiaccio e di altre proprietà fisiche che abbiamo imparato a conoscere.

L'analisi ci rivelò anzitutto una struttura in certo qual modo analoga a quella del diamante: la stessa

disposizione simmetrica di quattro atomi identici intorno a ciascun atomo della stessa specie. Nel presente caso il centro del tetraedro è occupato da un atomo di ossigeno, mentre altri atomi d'ossigeno occupano i quattro vertici del tetraedro stesso. Si verificano ad ogni modo talune piccole differenze nella struttura: in primo luogo gli atomi di carbonio del diamante sono tra loro contigui. Nel ghiaccio invece bisogna trovar posto agli atomi d'idrogeno. Se insinuiamo un atomo d'idrogeno fra ogni due atomi d'ossigeno otteniamo una disposizione simmetrica, nella quale gli atomi si trovano in giusta proporzione. Ogni atomo d'ossigeno ha intorno a sé quattro atomi d'idrogeno ed ogni atomo d'idrogeno ha per vicini due atomi d'ossigeno; di conseguenza il numero degli atomi d'idrogeno è doppio di quelli d'ossigeno. Un modello costituito secondo queste regole è visibile nelle fig. B e C della tav. XX. Le palline bianche rappresentano gli atomi d'ossigeno, quelle nere gli atomi d'idrogeno. Non bisogna però dimenticare che l'analisi con i raggi X non permette di determinare la vera grandezza degli atomi d'ossigeno o di idrogeno. Tutto ciò che può fare è di trovare la distanza fra i centri di due atomi d'ossigeno attigui, distanza che è eguale alla somma dei diametri di un atomo d'ossigeno e uno d'idrogeno. Può darsi che l'atomo d'ossigeno occupi

tutto lo spazio e quello d'idrogeno nessuno, poiché si suppone che l'atomo d'idrogeno ceda il suo elettrone all'ossigeno rimanendo un puro nucleo; non si sa allora in quali dimensioni rappresentarlo. Nel

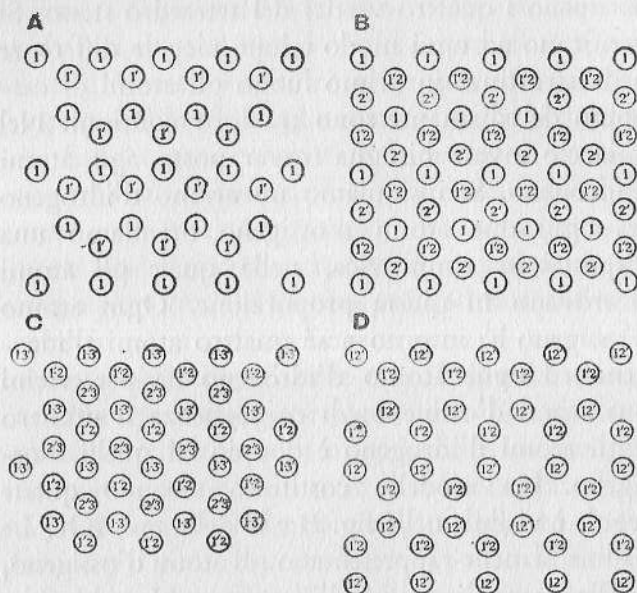



FIG. 46. Disposizione degli atomi nel diamante e nel ghiaccio.
Fig. A. Diamante, uno strato - Fig. B. Due strati - Fig. C. Tre strati - Fig. D. Due strati d'atomi d'ossigeno nel ghiaccio.

costruire i modelli dobbiamo pur dare una certa grandezza alle palline che rappresentano gli atomi, per cui vanno interpretati con la consueta riserva.

Una seconda differenza fra diamante e ghiaccio è di carattere piú delicato e difficile ad intendersi; ma

vale la pena di cercare di capirla. Se il lettore la dovesse trovare troppo difficile la può saltare senza pericolo di perdere il filo della nostra esposizione.

Immaginiamo di osservare dall'alto uno strato d'atomi del nostro modello di diamante, come in fig. 46 A. Gli atomi di carbonio contrassegnati con 1 sono quelli supposti giacenti sul piano del foglio, mentre quelli contrassegnati con 1' sono un po' sollevati rispetto agli altri. Si consideri per maggior chiarezza anche la fig. A della tavola XIV. Prendiamo ora un altro strato identico al primo e contrassegniamo con 2 e 2' gli atomi che nel primo strato abbiamo indicato con 1 e 1'. Sovrapponiamo i due strati in modo che ogni atomo 2 càpiti sopra ogni atomo 1'; allora i due strati risultano reciprocamente sfalsati inquantoché gli atomi piú bassi del secondo strato vengono a trovarsi sopra gli atomi piú alti del primo strato. È quanto succede nel diamante come è visibile nella fig. A della tavola XIV; il risultato, visto dall'alto, appare come in fig. 46 B. L'indicazione 1'2 significa che in quel punto un atomo 2 si trova sopra un atomo 1'. A questi due strati sovrapponiamo ora un terzo contrassegnandone prima gli atomi con i numeri 3 e 3'; gli atomi 3 vengano a cadere sopra gli atomi 2'. La disposizione risultante è visibile in fig. 46 C. Ripetendo il procedimento sempre nell'ordine 1, 2, 3, 1, 2, 3, otteniamo la struttura del diamante. Incominciamo

di nuovo con uno strato di atomi 1 e sovrapponiamogli un secondo strato di atomi 2 adesso, però, nel modo indicato nella fig. 46 D; questa seconda disposizione, occorre notarlo, non è affatto identica alla precedente. Ora gli atomi 2' sono sovrapposti agli atomi 1; lo strato degli atomi 2 è stato girato nel proprio piano di 180°. Ripetendo con uno strato 1, poi di nuovo con uno strato 2, otteniamo la disposizione degli atomi d'ossigeno nel ghiaccio. La struttura di questo viene completata disponendo un atomo di idrogeno fra ogni due d'ossigeno.

Il modello del cristallo di ghiaccio della fig. B in tav. XX rende senz'altro conto della disposizione dei suoi atomi. Il perché poi l'un cristallo (quello del diamante) ripete ogni volta una serie di tre strati e l'altro (quello di ghiaccio) solo di due, non lo sappiamo.

Osservando attentamente il modello di ghiaccio, la sua architettura ci aiuta a capire ciò che conosciamo delle proprietà del ghiaccio. La struttura esagonale salta subito all'occhio, mentre la lacunosità del modello spiega la leggerezza del ghiaccio e dei fiocchi di neve. Il ghiaccio galleggia sull'acqua; quindi le molecole d'acqua, quando si associano a formare ghiaccio, debbono occupare piú spazio di prima. Se ne schiacciamo il modello, evidentemente questo occuperà meno spazio: qualcosa di simile deve avvenire quando il ghiaccio fonde

sotto pressione. Una ben nota esperienza illustra questo fatto. Sosteniamo per gli estremi un blocco di ghiaccio e gettiamogli a cavalcioni un sottile filo metallico teso da pesi come in fig. 47. Il filo penetra adagio adagio nel ghiaccio, il quale torna man mano a chiudersi sopra di esso; quando final-

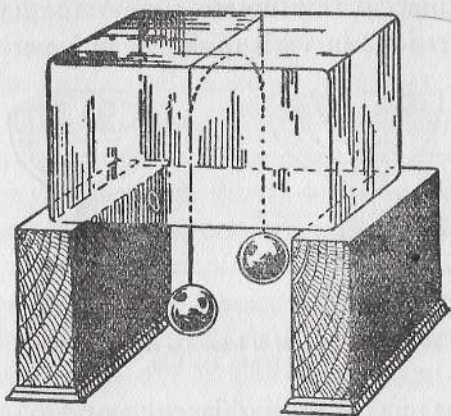



FIG. 47. Taglio di un blocco di ghiaccio per mezzo di un filo metallico (secondo Tyndall).

mente il filo avrà completamente attraversato il blocco e cadrà a terra con i suoi pesi attaccati, il blocco è ancora integro. Sembrerebbe che la pressione del filo metallico distruggesse la struttura cristallina del ghiaccio liberando un certo numero di molecole. In altre parole: una certa quantità di ghiaccio si scioglie sotto la pressione del filo diventando acqua, che premuta via da sotto il filo passa

al di sopra di questo, nella fenditura lasciata libera del filo, ove congela di nuovo saldando insieme le due metà del blocco di ghiaccio. Possiamo immaginare che le molecole ritornino al loro posto invitatevi dal ghiaccio, che sui due lati tende loro la mano.

Del ghiaccio frantumato si può foggiare sotto forte pressione in varii modi. Si può per esempio

FIG. 48. Lo stampo di legno e la coppa di ghiaccio (secondo Tyndall).

ricavarne una coppa di ghiaccio: a questo scopo occorrono due o tre stampi in legno di bosso di forma opportuna. In uno stampiamo la coppa, in un altro il gambo, in un altro ancora il piede: indi saldiamo insieme i tre pezzi tenendoli per qualche istante nella giusta posizione. Gli stampi da noi usati per fare la coppa mostrata in fig. 48 sono ancora quelli adoperati da Tyndall per lo stesso scopo.

Quando Tyndall faceva questi esperimenti, stava elaborando una teoria sul movimento dei ghiacciai, e gli esperimenti gli servivano per illustrare le sue

argomentazioni. Tyndall era fisico e nel contempo alpinista; ambedue queste sue qualità lo spingevano a studiare i ghiacciai, dei cui moti egli eseguí una lunga serie di misure.

I ghiacciai scendono dalle vette coperte di neve, scorrono lungo le valli e defluiscono nei piani quasi fossero dei fluidi: però molto viscosi, poiché il loro moto è assai lento, da pochi centimetri al giorno per taluni ghiacciai ad alcuni metri per altri. Ciò che ha sempre sorpreso ed interessato è la maestosità del movimento e la stranezza di una sostanza cosí fragile e cristallina che scorre come un fiume, contornando le rocce, seguendo la sinuosità di una vallata e superando precipizi senza disfarsi. Al tempo di Tyndall si teneva molto in conto una teoria, secondo la quale il ghiacciaio si scioglie in punti del suo interno ove la pressione è assai grande e l'acqua prodotta scorre via in modo da mitigare la pressione. Quest'acqua rigela, si diceva, quando raggiunge spaccature o cavità ove non regna piú la pressione che la può mantenere fluida. Di conseguenza il ghiacciaio doveva per cosí dire contrarsi ove compresso, espandersi di nuovo altrove e cosí accomodarsi entro il proprio letto. Ma questa spiegazione non soddisfa se si considerano i ghiacciai delle regioni artiche od antartiche, i quali pure scorrono benché la temperatura sia cosí bassa che nessuna pressione concepibile potrebbe fondere il ghiaccio.

Forse, considerando un po' piú a fondo il comportamento di una struttura cristallina, possiamo spiegarci in un altro modo come avviene il movimento dei ghiacciai: la nostra interpretazione non è molto diversa da quella di Tyndall, ma meno esposta a obbiezioni. Esistono molte sostanze che si possono far fluire al pari di un ghiacciaio: dei metalli si possono schizzare attraverso fori; dei fili si lasciano trafilare; delle piastre laminare. Persino la superfice del vetro oppure di un cristallo cosí perfetto come lo spato d'Islanda si può far fluire, come ha mostrato Sir George Beilby. Ora tutte queste sostanze sono cristallizzate; come del resto ci è stato dimostrato anche dai raggi X. Ed esse sono altrettanto cristallizzate, dopo aver defluito, quanto prima. Ne vedremo alcuni esempi quando tratteremo dei metalli.

La sostanza si adatta alla pressione cambiando di forma. Interi strati di atomi o molecole vengono in un momento sradicati dalla loro posizione, fatti scorrere sopra le teste — per cosí dire — degli atomi sui quali giacciono e deposti in una nuova posizione, oppure vengono tenuti in movimento per un certo tempo. Quando per un istante si arrestano, il cristallo è di nuovo perfetto e, quando vengono sradicati, i legami si rompono come se la sostanza fosse in procinto di fondersi. Questo dev'essere specialmente il caso quando, come col ghiaccio, la

sostanza si contrae nella fusione, quando cioè i legami, rompendosi sotto la pressione, permettono agli atomi ed alle molecole di assumere posizioni nelle quali occupano meno spazio di prima. Quando un pezzo di metallo viene piegato o pressato in una nuova forma, gli strati atomici dei cristalli di cui è costituito slittano gli uni sugli altri ed è allora comprensibile come slittamenti successivi possano condurre a qualsiasi cambiamento di forma.

Fig. 49. Un pacco di assicelle disposte come in A si piega sotto un carico. Poste di coltello come in B le assicelle si piegano molto meno. Se disposte come in C ed incollate insieme da una sostanza molto viscosa, cedono lentamente e continuamente all'azione del peso.

Nel caso del ghiaccio può darsi che slittamento e fusione prendano contemporaneamente parte alla variazione di forma. Lo slittamento dei piani cristallini del ghiaccio è stato sovente osservato. Stacchiamo un blocco da una distesa di ghiaccio formatosi naturalmente su di uno stagno. Se un si-

mile blocco viene sostenuto ai suoi estremi mantenendolo nella stessa posizione nella quale crebbe alla superfice dell'acqua, esso si piega sotto un peso, proprio come farebbe una trave (fig. 49 A). Se lo si dispone di costa in modo che gli strati che prima erano orizzontali ora siano verticali ed i loro piani siano paralleli alla retta che congiunge i punti d'appoggio (fig. 49 B), il blocco cede in realtà di pochissimo. Se infine i piani degli strati che prima erano orizzontali si dispongono perpendicolari alla retta congiungente i punti d'appoggio, gli strati scorrono l'uno sull'altro ed il blocco di ghiaccio cambia di forma (fig. 49 C). Può darsi che si ripeta qui il processo che abbiamo visto nel caso del filo metallico tagliante un blocco appoggiato agli estremi: sotto la pressione ed una fusione locale alcune molecole acquistano una libertà sufficiente a permettere loro, quasi fossero liquide, di portarsi in un altro punto, ove senz'altro si saldano di nuovo (tanto a destra che a sinistra) al ghiaccio, semplicemente perché c'è sempre un posto che le attende. Possiamo però anche considerare il fenomeno in senso generale come una conseguenza dello scorrimento di strati l'uno sull'altro.

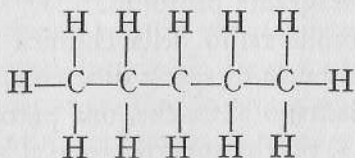
È curioso vedere quanto prontamente si saldino insieme dei pezzi di ghiaccio. Se si sovrappongono due pezzi sufficientemente piatti, si può già dopo pochi istanti afferrare il pezzo inferiore e capovolgere

i due pezzi senza che quello ora inferiore si stacchi e caschi a terra. Analogamente si saldano due pezzi premuti insieme sott'acqua, anche se questa è calda.

Rivolgeremo ora la nostra attenzione a quelle particolari molecole costituite da una catena aperta di atomi di carbonio, cui abbiamo accennato alla fine del capitolo precedente. Quando considerammo la struttura del diamante, abbiamo notato una certa disposizione degli atomi di carbonio che si riproduce per tutto il diamante. Si trattava dell'associazione di sei atomi di carbonio a formare un anello. Abbiamo visto una disposizione analoga nello scheletro della molecola del benzene, che è costituita da sei atomi di carbonio disposti ai vertici di un esagono, frangiato con sei atomi di idrogeno. Dicemmo anche che un gran numero di altre importanti molecole è costruito sullo stesso principio, con la differenza che gli atomi di idrogeno vengono sostituiti da un numero vario di altri atomi o gruppi atomici. Lo studio di queste molecole forma oggetto di uno dei due grandi rami della chimica organica; tali molecole formano sostanze che si chiamano « aromatiche » perché molte di esse possiedono un fragrante profumo.

L'altro grande ramo della chimica organica si occupa di sostanze di specie differente. Queste sostanze si chiamano alifatiche, una parola che vuol dire « grasse », poiché appartengono al loro gruppo

tutti i grassi e molti loro derivati. Il chimico ha potuto provare che qui la molecola è costituita da una catena aperta di atomi di carbonio, ornata lungo i lati ed agli estremi da altri atomi, specialmente di idrogeno. Nel diamante appare chiara la struttura ad anelli; sembra però ch'esso contenga anche delle catene aperte, sicché il diamante conterrebbe ambedue le forme fondamentali dei due grandi rami della chimica organica.

Nel precedente capitolo abbiamo considerato alcuni esempi di struttura ad anello e rimandato ad ora lo studio di quella a catena. La catena è costituita da una serie di maglie, ciascuna delle quali è formata in generale da un atomo di carbonio e due d'idrogeno; gli estremi sono invece costituiti da gruppi atomici di vario tipo, di cui taluni sono assai comuni e conferiscono alla catena ben note caratteristiche. Nel caso piú semplice gli estremi sono rappresentati da atomi d'idrogeno ed abbiamo allora la molecola rappresentativa degli idrocarburi saturi o paraffine. Per esempio la formola di costituzione del pentano viene scritta dai chimici in questo modo:

Il pentano è un liquido infiammabile che viene usato come combustibile in lampade campioni, cioè in lampade che servono di confronto per altre lampade, perché bruciano con fiamma stabile e costante. La precedente formola di costituzione vuol mostrare in qual modo i varii atomi sono connessi l'uno all'altro. Ogni atomo di carbonio è unito a quattro altri atomi. L'atomo di carbonio non può legarsi strettamente ad un numero di atomi maggiore di quattro, sicché alla molecola non si può aggiungere piú nulla, senza prima spezzarla. Una simile molecola si dice « satura ». Nella formola la molecola appare come se giacesse interamente in un piano; il che va in parte attribuito alla comodità di disegno, in parte al poco che ancora si sa sulla sua vera struttura. Uno dei cómpiti dell'analisi con i raggi X è appunto di determinare piú rigorosamente di quanto sia stato possibile in precedenza la reciproca posizione degli atomi in una molecola e di misurarne le dimensioni lineari. Precisamente nel caso di queste lunghe molecole cateniformi, i raggi X hanno potuto registrare inattesi successi. Al fine di illustrare queste nuove conoscenze ci occorre però decisamente un modello od un disegno in prospettiva; un modello della probabile forma della molecola di pentano è dato in fig. A della tav. XXI.

Molte sostanze appartenenti alla serie delle paraf-

fine si trovano mescolate insieme nelle sorgenti di petrolio. Esse sono infiammabili perché si scompongono con facilità quando convenientemente eccitate in presenza di ossigeno; i loro atomi entrano allora a formare nuovi composti con forte sviluppo di calore. Il rappresentante piú semplice della serie contiene una sola maglia; è un gas chiamato metano o gas delle paludi, rappresentabile con la formola di costituzione:

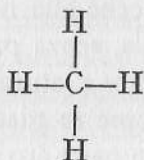
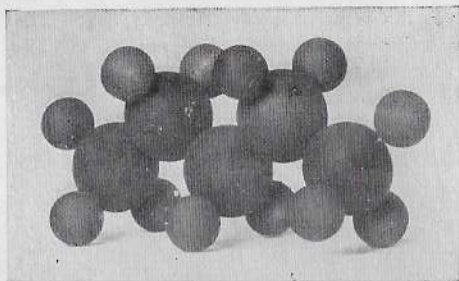
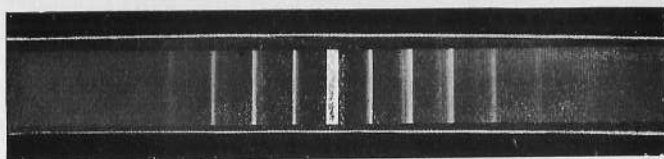
$$\begin{array}{ccccc} & & H & & \\ & & | & & \\ H & — & C & — & H \\ & & | & & \\ & & H & & \end{array}$$

Esso gorgoglia da stagni contenenti vegetali in putrefazione. Col crescere della lunghezza della catena, la sostanza è piú stabile. Il pentano, la cui molecola possiede cinque maglie, è liquido alla temperatura ordinaria e bolle a 36° C; il pentadecano, con quindici maglie, bolle a 257° C; mentre il pentacosano con venticinque maglie è solido alla temperatura ordinaria e fonde a 54° C. Si suppone che le lunghe molecole degli idrocarburi abbiano la tendenza di disporsi fianco a fianco, come i fiammiferi in una scatola; vedremo che questa ipotesi è largamente confortata dai risultati dell'analisi con i raggi X. È perciò presumibile che, piú le molecole sono lunghe, piú sono grandi le forze necessarie

TAVOLA XXI.

A

B

C

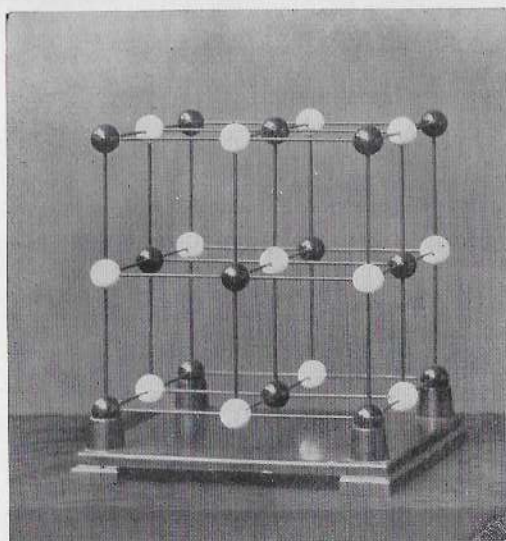
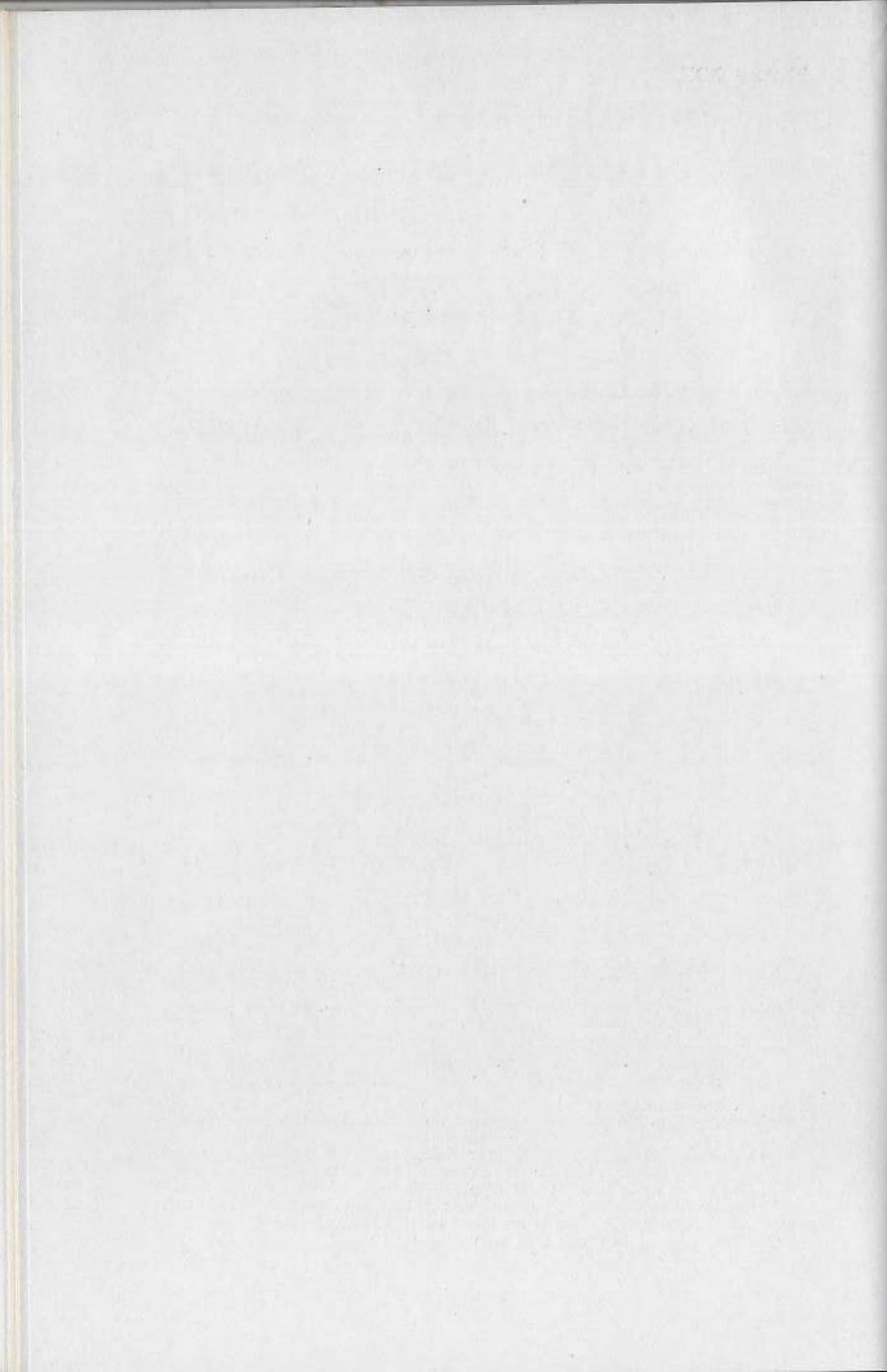
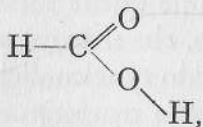



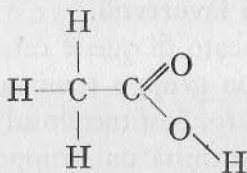
FIG. A. Modello di una molecola di pentano contenente cinque atomi di carbonio. Le palline piú grosse rappresentano atomi di carbonio, quelle piú piccole atomi di idrogeno.

FIG. B. Spettro di raggi X di un idrocarburo contenente 18 atomi di carbonio, ottenuto con metodo mostrato in fig. 52 (Müller).

FIG. C. Questo modello mostra la disposizione degli atomi di sodio e di cloro nel cristallo di salgemma; le palline nere rappresentano atomi di sodio, quelle bianche di cloro o viceversa. Il modello riguarda la sola disposizione e non la forma o la grandezza degli atomi.

per staccarle le une dalle altre; sicché, già per questa sola ragione, quanto piú la catena è lunga tanto piú elevati devono essere il punto d'ebollizione ed il punto di fusione. In generale tutto il gruppo presenta dei bassi punti di ebollizione e fusione: la coesione fra le molecole non è eccessiva. Il manto d'atomi d'idrogeno che le copre sembra impedire la loro associazione con altre molecole; per esempio quelle degli acidi. In realtà la parola « paraffina » deriva da due parole latine: *parum* ed *affinis* che significano poca affinità. Tuttavia, come già detto, si combinano facilmente con l'ossigeno quando le condizioni sono favorevoli.

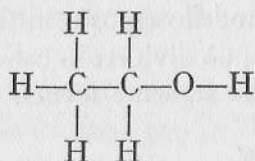
Il comportamento di queste catene varia assai se togliamo loro un gruppo terminale e lo rimpiazziamo con un altro. Sostituendo ad uno degli atomi d'idrogeno d'estremità un gruppo contenente un atomo di carbonio, due di ossigeno ed uno d'idrogeno, otteniamo un'altra importantissima serie di composti chiamati « acidi grassi ». Il gruppo CO.OH si chiama gruppo carbossilico. Anche qui la catena può essere di varia lunghezza. Se possiede un sol atomo di carbonio, il chimico la rappresenta cosí:

$$\mathrm{H{-}C}{\begin{matrix} \nearrow \mathrm{O} \\ \searrow \mathrm{O} \searrow \mathrm{H} \end{matrix}},$$

intendendo che, dei quattro legami (o valenze) con i quali l'atomo di carbonio s'unisce ad altri atomi, uno va a un atomo d'idrogeno, un altro ad un atomo di ossigeno, che a sua volta è legato ad un atomo d'idrogeno, e due vanno ad un atomo d'ossigeno che ne resta saldamente legato all'atomo di carbonio. Questa sostanza è l'acido formico, il quale viene secreto dalle formiche ed ha la proprietà di irritare assai la pelle, come sappiamo. Se a questa prima maglia di catena ne aggiungiamo un'altra otteniamo l'acido acetico, che conferisce l'acidità all'aceto. La sua formola è

```
     H
     |      O
     |    //
H —  C —  C
     |     \
     |      O
     H       \
              H
```

L'acido butirrico possiede quattro atomi di carbonio; è la sostanza che dà al burro rancido il suo caratteristico sapore ed odore. L'acido laurinico ha dodici atomi di carbonio e si trova nell'olio delle bacche d'alloro e in quello di cocco. L'acido miristico ne ha quattordici e si trova nel burro di noce moscata. Tutte queste sostanze sono liquide. L'acido palmitico, che si trova nell'olio di palma, ne ha sedici e l'acido stearico diciotto. I due ultimi acidi sono solidi alla temperatura ordinaria. Ven-

gono usati nella fabbricazione delle candele di stearina e, leggermente modificati, sono i piú importanti costituenti del grasso animale.

Gli alcool costituiscono un'altra di queste serie di molecole cateniformi. Derivano dalle paraffine per sostituzione di un atomo d'idrogeno d'estremità con un gruppo formato da un atomo di idrogeno e uno d'ossigeno, detto gruppo ossidrilico. Cosí:

$$
\begin{array}{ccccccc}
 & & H & & H & & \\
 & & | & & | & & \\
H & — & C & — & C & — & O — H \\
 & & | & & | & & \\
 & & H & & H & &
\end{array}
$$

è l'alcool ordinario o etilico C_2H_5OH.

Continuando in tal modo possiamo descrivere un grandissimo numero di sostanze, la cui molecola consta di una catena di maglie CH_2 i cui estremi sono occupati da gruppi varii di atomi. Talora anche uno o piú atomi d'idrogeno laterali vengono sostituiti da altri atomi o gruppi atomici; talora infine la struttura è ancora piú complicata. La semplicità del principio generale di formazione e la meravigliosa varietà ed influenza dei particolari affascinano lo spirito. Perché piante od animali diversi, oppure parti diverse della stessa pianta od animale contengono queste catene d'atomi di carbonio di varia lunghezza, dalle quali dipendono

grandemente il loro sviluppo, le loro proprietà e le loro caratteristiche? Evidentemente tutto l'effetto dipende, in primo luogo, dalle proprietà dell'atomo di carbonio ed è ciò che conferisce un particolare interesse alle forme cristalline del carbonio, cioè al diamante ed alla grafite.

Consideriamo di nuovo il nostro modello di diamante e domandiamoci se è possibile vedere lo scheletro della catena, cosí come abbiamo visto quello dell'anello. Il modello esposto in fig. A tav. XIV mostra che lo si può dividere in catene di lunghezza qualsivoglia della seguente forma:

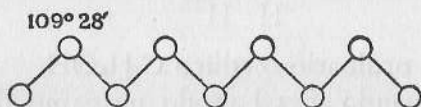



FIG. 50. Catena d'atomi di carbonio nel diamante.

nella quale l'angolo che si ripete ai vertici si può calcolare di 109° 28'. Possiamo supporre che questa sia una forma semplice della catena. Noi non facciamo che delle ipotesi, cercando di immaginarci delle possibili soluzioni del nostro problema, da sottoporre alla verifica sperimentale, ed anche quando l'esperienza sembra portare una conferma del nostro modo di vedere, non dobbiamo fare troppo affidamento su di essa. Se questa fosse la catena, ad ogni atomo di carbonio dovrebbero essere collegati due atomi d'idrogeno. I due punti d'attacco di

quest'ultimi, insieme ai punti d'attacco dei due atomi di carbonio attigui, formerebbero quattro punti simmetricamente disposti, simili ai quattro punti nei quali ciascun atomo di carbonio è legato ai suoi quattro vicini; la disposizione che ne risulta è visibile in fig. A della tav. XXI. Questa rappresentazione offre maggiori particolari della formola di costituzione dei chimici, la quale è unicamente una rappresentazione in un piano, mentre la nostra figura mette in rilievo anche la terza dimensione. E senza dubbio la vera struttura della molecola è tridimensionale. Il chimico non ha finora costruito formole a tre dimensioni perché l'esperienza non gli ha ancora fornito indicazioni sicure sull'architettura molecolare. Tenteremo di fare un ulteriore passo innanzi; con qualche esitazione, poiché non siamo ancora sicuri d'interpretare in modo esatto i risultati dei nostri nuovi metodi d'indagine, benché ci regga la ferma speranza ch'essi si affermeranno definitivamente.

Anni or sono siamo riusciti, con l'aiuto dei raggi X, a misurare esattamente la lunghezza delle molecole cateniformi. La scoperta del metodo risale ad una curiosa circostanza. Si doveva esaminare ai raggi X un determinato cristallo e, siccome questo era soggetto ad un rapido deterioramento per causa dell'umidità dell'aria, venne ricoperto con un sottile strato di paraffina solida, quale viene di solito ado-

perata nei laboratorii per isolare elettricamente. Orbene, all'analisi coi raggi X, si verificavano delle riflessioni di questi ultimi (vedasi pag. 153) che non si potevano conciliare con quanto allora si sapeva. Si riconobbe che erano dovute alla paraffina. La paraffina commerciale è un miscuglio d'idrocarburi della serie grassa epperciò non adatta per esperienze di precisione. Ora avvenne che uno studioso entusiasta di chimica organica, il dott. Le Sueur, preparasse un gran numero di queste sostanze a molecola cateniforme allo stato puro per cui tali sostanze divennero disponibili per i nostri scopi. Questi e molti altri preparati furono esaminati ai raggi X con risultati assai interessanti ed in generale abbastanza semplici.

FIG. 51. Disposizione schematica delle molecole negli strati di una sostanza come l'acido stearico od un idrocarburo come il pentano.

Il particolare metodo qui seguito è un buon esempio del modo col quale si possono usare i raggi X. Un po' di sostanza solida viene portata su una lastrina di vetro e spianata comprimendola: considereremo fra poco l'importanza di questa compressione. La sostanza è ora, come risultò dall'analisi, disposta in strati paralleli al vetro. In ciascuno strato le molecole sono piú o meno perpendicolari al medesimo e congiunte insieme fianco a fianco. Si potrebbero rappresentare come in fig. 51, ove sono disegnati

tre strati; ogni strato è forse grosso mezzo milionesimo di millimetro e lo spessore è proporzionale alla lunghezza della molecola. Quando si fa passare un fascio di raggi X per un simile gruppo di strati sovrapposti, una piccola parte ne viene riflessa da ciascuno strato, proprio come avverrebbe con un fascio di raggi di luce che incidesse su una pila di lastre di vetro.

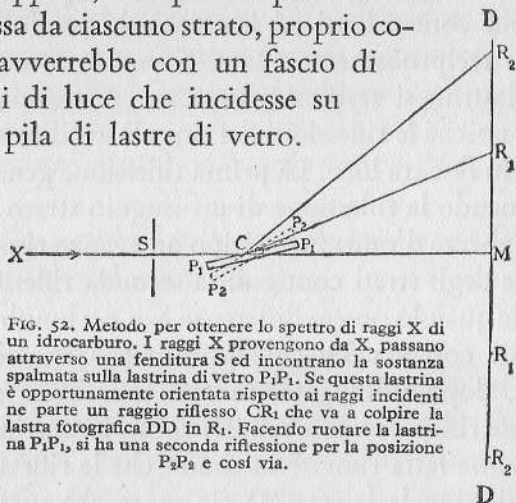



FIG. 52. Metodo per ottenere lo spettro di raggi X di un idrocarburo. I raggi X provengono da X, passano attraverso una fenditura S ed incontrano la sostanza spalmata sulla lastrina di vetro P_1P_1. Se questa lastrina è opportunamente orientata rispetto ai raggi incidenti ne parte un raggio riflesso CR_1 che va a colpire la lastra fotografica DD in R_1. Facendo ruotare la lastrina P_1P_1, si ha una seconda riflessione per la posizione P_2P_2 e così via.

Il principio su cui si basa l'esperienza è già stato esposto a pag. 150 e seg.

Supponiamo che nella fig. 52 sia S la sorgente dei raggi X e P_1 P_1 la lastrina di vetro che porta gli strati da esaminare. Quando i raggi X incontrano la lastrina sotto un angolo appropriato, le riflessioni dei singoli strati sono tutte concordanti e la riflessione risultante intensa. Supponiamo che CR_1 sia la direzione del raggio riflesso, il quale

produca un annerimento in R_1 della lastra fotografica DD. Se ora si fa ruotare la lastrina di vetro intorno ad un asse verticale passante per C e perpendicolare alla figura, l'effetto complessivo scompare, poiché le singole riflessioni dei vari piani non sono piú concordanti ed interferendo tra loro si elidono reciprocamente. Ma se si continua a ruotare la lastrina si verifica una seconda riflessione generale, poiché le riflessioni dei singoli strati sono di nuovo in fase tra loro. La prima riflessione generale si ha quando la riflessione di un singolo strato è di *una* lunghezza d'onda in anticipo od avanzo rispetto a quelle degli strati contigui; la seconda riflessione generale quando questa differenza è di *due* lunghezze d'onda e cosí via. Di conseguenza la lastra fotografica, dopo sviluppata, mostra una intera serie di queste riflessioni generali. Di solito la lastrina di vetro viene fatta ruotare in modo che le riflessioni impressionino la lastra DD sia sopra che sotto la retta mediana SM (fig. 52). La macchia centrale M è dovuta ai raggi X non deviati; questa parte della lastra fotografica viene usualmente schermata, in modo che l'azione diretta non risulti troppo forte. Su ciascuna banda di M appaiono allora chiaramente i differenti ordini di riflessione.

La fig. B della tav. XXI mostra i varii ordini di riflessione su una paraffina di 18 atomi di carbonio, ottenuti dal dott. Müller. Le riflessioni sono netta-

mente marcate; la distanza reciproca delle righe simmetriche si può esattamente misurare e quindi ricavarne lo spessore di uno strato della sostanza riflettente. Non siamo perfettamente sicuri che le molecole sieno perpendicolari allo strato, ma abbiamo delle buone ragioni, sulle quali non possiamo fermarci, per ritenere che sia veramente cosí. Si riscontra che la lunghezza della molecola catenifor-me aumenta con perfetta regolarità col numero degli atomi di carbonio della catena. Non solo, ma che molte di esse hanno esattamente quella lunghezza, che sarebbe da attendersi se avessero realmente la struttura della fig. 50.

L'insieme di tutte le ricerche di questo tipo conferma quanto il chimico ha immaginato sulla forma di queste molecole; l'ipotesi di quest'ultimo è stata meravigliosamente giusta. I raggi X hanno conferito precisione alle vedute del chimico, insegnando come la molecola va rappresentata nello spazio e determinandone la lunghezza. Possiamo aggiungere che se ne possono determinare anche le altre due dimensioni.

Torniamo ora su quel curioso fenomeno che le riflessioni dei raggi X migliorano assai quando la sostanza vien spalmata e pressata sulla lastrina di vetro. Probabilmente è dovuto ad una tendenza naturale da parte della sostanza a formare scaglie, in ciascuna delle quali le molecole sono perpendi-

colari alla scaglia medesima. Le molecole sono allineate una di fianco all'altra, come già abbiamo visto in precedenza, e la loro coesione è assai maggiore di quella fra scaglia e scaglia. L'unione tra queste è dovuta ai legami terminali delle molecole, i quali sono molto piú deboli. Si ripete il fenomeno che abbiamo incontrato nella grafite, di cui ciascuna scaglia sta tenacemente insieme, ma scorre facilmente sulle altre. È la causa per cui tanto i grassi che la grafite sono untuosi e scorrevoli al tatto. Quando la sostanza viene spalmata sul vetro, gli strati s'appiattiscono contro di esso, proprio come quando si strofina della grafite su una superfice; la riflessione dei raggi X diventa allora ottima, perché gli strati giacciono paralleli gli uni rispetto agli altri. Fondendo e raffreddando la sostanza, gli strati vengono sconvolti e distrutti; benché non vi sia alcun dubbio ch'essi si formino di nuovo, tuttavia non riescono a riflettere che assai male i raggi X. Vedremo nel prossimo capitolo come lo stesso effetto si ripeta nel caso dell'oro in foglie.

Le lunghe molecole cateniformi presentano ancora un'altra curiosa proprietà che merita la nostra attenzione. La catena paraffinica termina agli estremi con un atomo di idrogeno. Ogni scaglia è grossa quanto è lunga una molecola. Ma nel caso degli acidi grassi (pag. 201) i raggi X rivelano che lo strato è grosso il doppio di quanto è lunga una mo-

lecola; quindi le molecole sono disposte a due a due in colonna l'una sull'altra, unite per le loro estremità. Qualche cosa di simile era in realtà da prevedersi, poiché un gruppo carbossilico (CO.OH) tende facilmente ad unirsi con un altro della sua specie. Di conseguenza le catene si associano a coppie a formare catene di lunghezza doppia, con un atomo d'idrogeno ad ogni estremo ed i due gruppi carbossilici uniti tra loro al centro. Questo risultato consegue dalle misure eseguite con i raggi X. Di nuovo quindi questi confermano le conclusioni della chimica e le completano nei particolari.

Esiste un tipo di struttura cristallina che differisce profondamente da quelle finora considerate e che è di cosí grande importanza che non possiamo fare a meno di ricordarla. I cristalli dell'ordinario sale da cucina ne sono degli ottimi esempi.

Abbiamo visto a pag. 90 che talora le molecole si formano da due atomi di cui l'uno, avido d'un ulteriore elettrone, si satura a spese dell'altro atomo, il quale cede un elettrone che tiene debolmente legato a sé. Per esempio il cloro possiede una corte di diciassette elettroni periferici, di cui due nel guscio elettronico piú interno, otto nel mediano e sette nel piú esterno; l'atomo di cloro tende energicamente a integrare questo guscio, che quando è completo conta otto elettroni. L'atomo di cloro assume allora l'aspetto esterno di quello d'argon. L'atomo

di sodio ha normalmente undici elettroni periferici: due appartengono al guscio elettronico piú interno, cioè piú vicino al nucleo, otto al guscio mediano ed uno solo infine a quello esterno, invece che sette come nel caso del cloro. L'atomo di sodio non trattiene fortemente a sé quest'ultimo elettrone, sicché l'atomo di sodio assume allora l'aspetto esterno di quello di neon (vedasi pagina 86).

I due atomi sono ora caricati elettricamente: quello di cloro negativamente, perché possiede una carica elementare negativa in eccesso; quello di sodio positivamente perché ha una carica negativa in meno. Il principio che regge la crescita dei cristalli di cloruro di sodio è la tendenza da parte degli atomi di soddisfare per quanto possibile la reciproca attrazione delle loro cariche elettriche. Il sistema d'agglomeramento qui adottato dalla natura è di circondare ogni atomo di cloro con sei atomi di sodio e viceversa. Il modello del cloruro di sodio è visibile nella fig. C della tav. XXI. Esso è assai semplice: una disposizione reticolare cubica nella quale gli atomi di cloro e di sodio si alternano ad intervalli costanti su rette parallele agli spigoli del cristallo. Le palline bianche rappresentano atomi di cloro, quelle nere atomi di sodio o viceversa. È in conseguenza di tale disposizione che il sale cristallizza, separandosi dalla sua soluzione in forma di cristalli cubici. Questi cristalli non occorre che sie-

no però assolutamente cubici, poiché sono spesso blocchetti rettangolari, le cui facce sono tutte dello stesso tipo. Le frequenti differenze nelle loro dimensioni ed aspetto dipendono da circostanze casuali della loro crescita.

Molti sono i cristalli costruiti su questo principio, specialmente quelli dei sali metallici, nei quali il metallo ha perduto uno o piú elettroni ed il resto della molecola (che può essere un atomo od un gruppo d'atomi) li ha guadagnati. La struttura che ne consegue non è sempre cosí semplice come quella del sale da cucina, poiché i gruppi atomici non hanno tutti una conformazione cosí regolare come il semplice cloro. Nella calcite, l'atomo del metallo calcio (Ca) cede due elettroni al gruppo CO_3 ed il risultato è la forma romboedrica dello spato d'Islanda. Anche qui ciascun atomo metallico è circondato da sei gruppi CO_3 negativi e ciascuno di questi da sei atomi metallici positivi; il cristallo non è piú rettangolare perché i gruppi CO_3 non hanno forma sferica.

Capitolo Sesto

LA NATURA DEI CRISTALLI: I METALLI

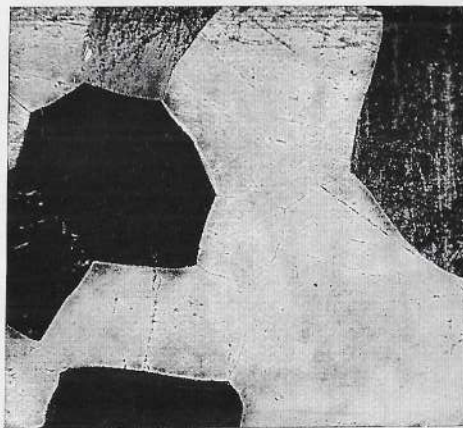
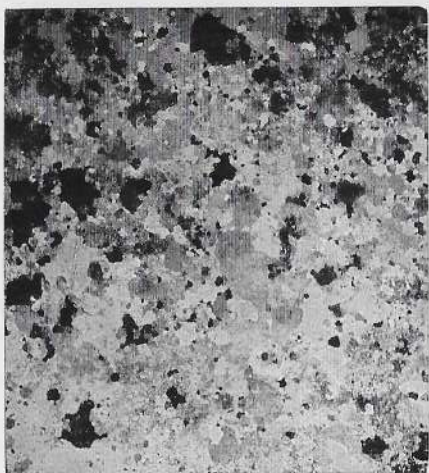
L'uso dei metalli è stato uno dei piú grandi fattori nello sviluppo delle attività umane. Il suo inizio si perde cosí lontano nei tempi che si possono fare solo delle ipotesi sul modo col quale l'uomo fabbricò per la prima volta arnesi ed armi metalliche. Forse trovò dapprima del rame allo stato nativo, e ne fu probabilmente il peso che gli suggerí d'utilizzarlo nelle lotte. Il rame è troppo molle per potersi affilare; ma dopo non molto tempo l'uomo si sarà accorto che, in lega con lo stagno, il rame è molto piú duro ed utile che non allo stato puro. Forse le pietre stesse con le quali erano costruiti i primi forni per fondere il rame contenevano dello stagno; forse ancora il rame e lo stagno si trovavano insieme nello stesso minerale. Cosí ebbe inizio l'èra del bronzo. Il ferro comparve molto piú tardi. Da queste remote origini, l'industria dei metalli crebbe sviluppandosi continuamente fino ad assumere le attuali spettacolose proporzioni in ogni parte del mondo, dimostrando quanta parte hanno i metalli nella vita dell'uomo.

Nel corso dei millenni è andata formandosi una grande esperienza. Una parte si trova nei libri, una parte è ancora tradizione, direttamente tramandata

dai maestri agli allievi. Esiste anche un senso per la natura, le condizioni e le proprietà di un metallo, che non si può tradurre in parole, bensí apprendere solo attraverso l'esempio, purché vi si abbia buona attitudine. Né è cosa da poco: il traffico commerciale ed il benessere di una nazione ne possono risentire l'influenza.

D'altra parte le proprietà dei metalli debbon dipendere in prima linea da quelle dei singoli atomi, in secondo luogo dalla loro disposizione nei cristalli. Negli stessi centri metallurgici si è capito che i ricercatori scientifici con i loro microscopi possono portare un certo ordine nella massa disordinata delle conoscenze metallurgiche e che la loro attività può far migliorare la qualità del prodotto ed aumentare la certezza del risultato. Tuttavia, come abbiamo già detto, il microscopio può servire fino ad un certo limite: il suo potere s'arresta assai prima del punto che ci occorre raggiungere per capire in qual modo si comportano gli atomi per conferire ad ogni materiale le sue caratteristiche proprietà. Esso ci può rivelare la presenza dei singoli cristalli nel metallo, ma non la disposizione degli atomi in questi cristalli (Tav. XXII e XXIII).

I raggi X ci hanno aperto nuovi orizzonti, poiché ci permetteranno di capire l'intima ragione delle complesse proprietà dei metalli. Probabilmente occorrerà ancora del tempo prima d'ottenere dei

TAVOLA XXII.

Due fotografie dell'alluminio.

La superfice è stata convenientemente preparata (attacco con reattivo) per far risaltare i singoli cristalli. Questi diffondono la luce incidente in modo diverso a seconda della loro orientazione. La figura superiore è un po' rimpicciolita, quella inferiore fortemente ingrandita.

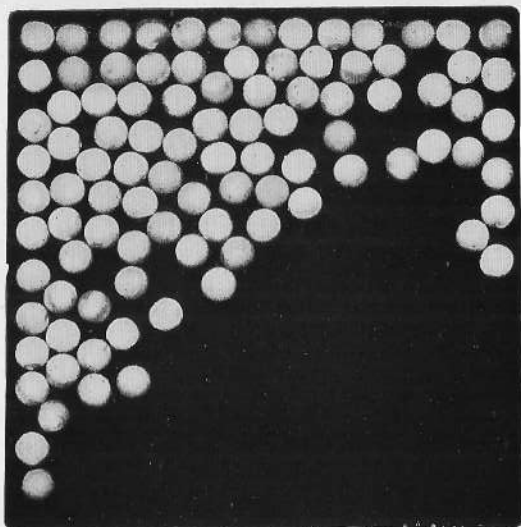
(Da una monografia di Carpenter ed Elam).

La superficie d'un acciaio.

La fotografia mostra i contorni irregolari dei grani cristallini ed in ogni grano una confusione di righe che costituiscono la cosiddetta struttura di Widmanstätten. Questa è dovuta al fatto che l'utensile politore ha intersecato gli strati atomici, cosí come vengono intersecati nella politura strati di madreperla.

(Dal «Belaiew: *Crystallisation of Metals*»).

TAVOLA XXIV.

A

B

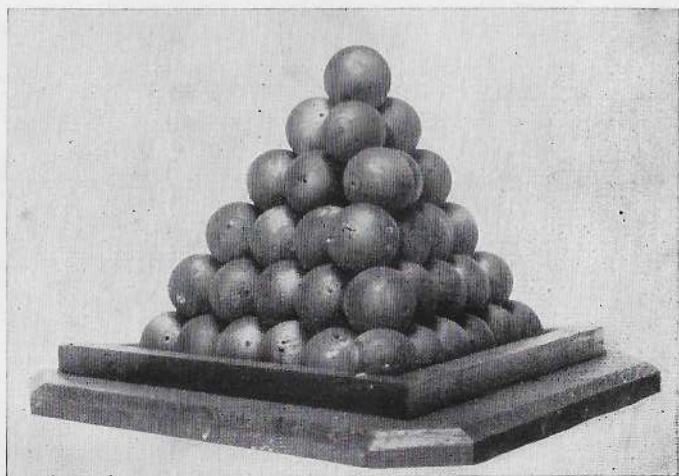
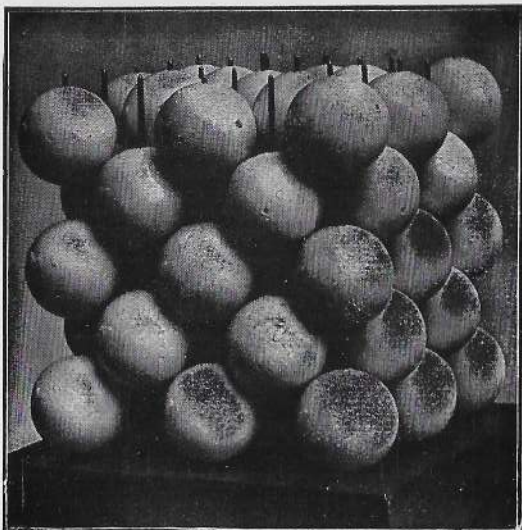



FIG. A. Pallini da caccia in una scatola. Si distinguono piccoli gruppi di pallini addensati, divisi da spazi irregolari.
FIG. B. Piramide di palle, costruita per sovrapposizione di strati come in fig. 53.

TAVOLA XXV.

A

B

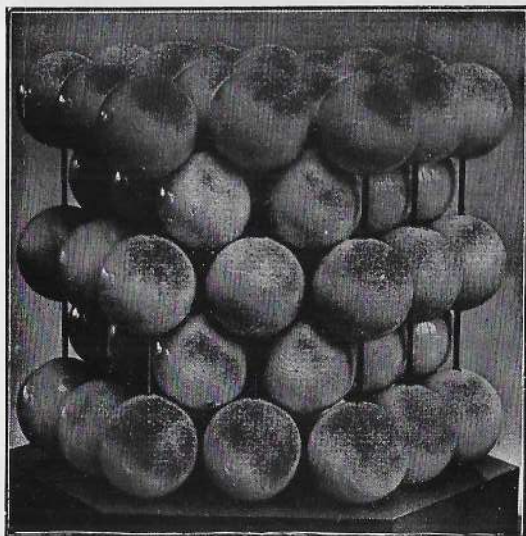



FIG. A. Assestamento cubico. - FIG. B. Assestamento esagonale.

(Dal «POPE: *Aspetti moderni della teoria molecolare*»).

In A le palle sono disposte in modo da formare un cubo. Si tratta della identica disposizione di cui in B, tav. XXIV. Lo strato compatto della fig. 53 giace orizzontale nella fig. B. di tav. XXIV, mentre è perpendicolare ad una diagonale del cubo in fig. A di questa tavola.

La fig. B mostra l'altro tipo di assestamento compatto. Ogni strato orizzontale è del tipo di quello in fig. A.

risultati in grande stile. Si riandrà l'esperienza di millenni cercando di spiegarla. Siamo in un campo ben diverso da quello, per esempio, dell'elettrotecnica oppure della radio, che ne è un ramo particolare. In questo, tutto è sorto dal lavoro dei fisici nei laboratori e lo sviluppo è stato guidato dalla conoscenza e dalla preparazione. La lavorazione dei metalli è stata invece guidata attraverso i tempi da prove ed errori, dall'esperienza sorretta da pochissime conoscenze teoriche. È stato un processo assai lento, che è durato lungo tempo ed i cui risultati sono degni d'ogni considerazione. Questi vanno ora studiati alla luce dei raggi X.

Già si è riusciti a trovare delle spiegazioni — se tali si possono chiamare — per alcune proprietà dei metalli. Queste dipendono dalla loro architettura cristallina, come era in certo qual modo da attendersi. Talvolta i cristalli sono già riconoscibili ad occhio nudo; talora invece occorre preparare in modo acconcio la superficie del metallo e sottoporla al microscopio. Ma il modo piú facile e piú completo per scoprirli è per mezzo dei raggi X, i quali ci consentono di mettere in luce le piú fini strutture.

Quasi tutte le forme cristalline dei metalli sono già state esaminate ai raggi X e si è trovato che la loro struttura è generalmente assai semplice. Per esempio gli atomi d'oro, argento, rame e alluminio

sono disposti come le palle in quelle pile di proiettili che un secolo fa si accumulavano vicino ai cannoni. Vale la pena di considerare un po' piú attentamente questa disposizione, benché si tratti in sostanza d'una ripetizione del confronto, di cui a pag. 188, fra le strutture del diamante e del ghiaccio. Supponiamo di riunire un certo numero di palle limitandole tutt'attorno come in fig. 53. Su questo primo strato di palle ne sovrapponiamo un secondo formante un triangolo un po' piú piccolo e cosí via finché abbiamo costruito una intera piramide, come in fig. B di tavola XXIV. Evidentemente non è possibile addensare di piú le palle. Se ora consideriamo i successivi strati piú da vicino vediamo che le palle di uno strato si trovano esattamente sopra quelle del quarto strato sottostante. In mancanza di un modello possiamo intenderci mediante la fig. 54 A. Le crocette rappresentino i centri delle palle di un certo strato, i cerchi vuoti quelli delle palle dello strato sovrapposto ed i cerchi pieni (di cui uno solo in fig. 54) quelli delle palle del terzo strato. I centri delle palle del quarto strato si troverebbero sopra

FIG. 53. Disposizione compatta di palle in uno strato.

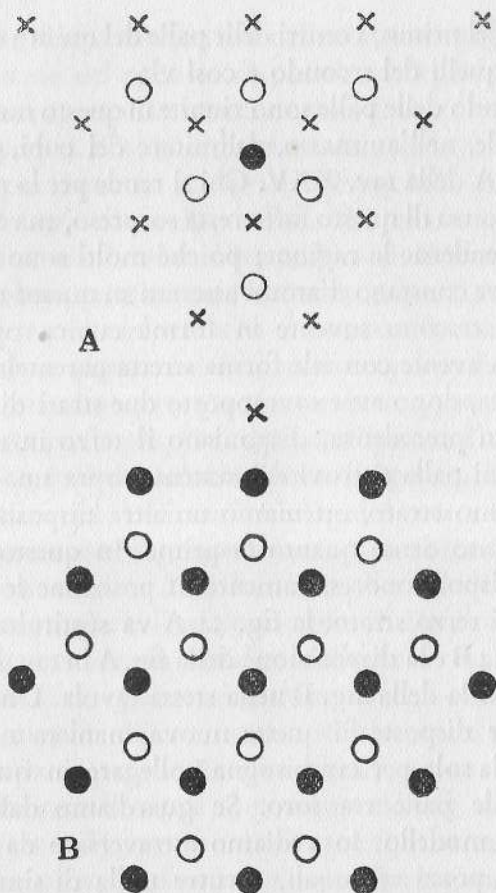



FIG. 54. In A è riprodotta la disposizione degli strati come li vedrebbe un osservatore che guardasse in direzione di una diagonale del cubo della fig. A in tav. XXV. Il cerchio nero pieno rappresenta la palla che si trova nel vertice; i cerchi vuoti rappresentano le sei palle dello strato successivo e le crocette le quindici palle del terzo strato.
La fig. B mostra la disposizione della fig. B di tavola XXV vista dall'alto. I diciannove cerchi neri pieni rappresentano le palle dello strato piú in alto, e i dodici cerchi vuoti le palle dello strato sottostante. Il terzo strato è identico al primo, il quarto al secondo, ecc. La disposizione si ripete ogni due strati; invece nella fig. A ogni tre strati.

quelli del primo; i centri delle palle del quinto strato sopra quelli del secondo e cosí via.

Quando delle palle sono riunite in questo modo, è possibile, nell'ammasso, delimitare dei cubi, come in fig. A della tav. XXV. Chi si rende per la prima volta conto di questo fatto resta sorpreso, ma è bene comprenderne la ragione; poiché molti sono i cristalli che constano d'atomi assestati in questo modo e che crescono sovente in forma cubica oppure in altra avente con tale forma stretta parentela.

Se ora, dopo aver sovrapposto due strati di palle come in precedenza, disponiano il terzo in modo che ogni palla si trovi esattamente sopra una palla del primo strato, otteniamo un'altra disposizione, altrettanto densa quanto la prima. In questo caso si corrispondono esattamente in posizione le palle di ogni terzo strato; la fig. 54 A va sostituita con la fig. 54 B e la disposizione della fig. A in tav. XXV con quella della fig. B nella stessa tavola. Una pila di palle disposte in questa nuova maniera non si regge da sola per cui bisogna collegare in qualche modo le palle tra loro. Se guardiamo dall'alto questo modello, lo vediamo attraversato da tanti piccoli pozzi esagonali, mentre nulla di simile si vede guardando il modello sotto un'altra direzione. Il modello possiede invero un asse di simmetria verticale, intorno al quale la disposizione degli atomi è tale che un cristallo costruito secondo

questo sistema formerebbe delle colonne esagonali.

Nel caso del cubo la disposizione degli strati si può immaginare in quattro modi diversi; vi sono strati perpendicolari a ciascuna diagonale del cubo e, siccome questo ha quattro diagonali, esistono quattro serie di strati paralleli. Ciò non vuol dire che gli atomi di uno strato qualsiasi possiedano una particolare coerenza in tale strato; bensí soltanto che gli atomi del cristallo si possono immaginare ordinati in quattro modi diversi secondo tali strati.

Ora è risultato che questi strati hanno grande importanza per le proprietà dei metalli aventi l'assestamento o reticolo cubico. L'oro, l'argento, il rame, l'alluminio ed altri metalli analoghi si possono trafilare, laminare e foggiare nei piú svariati modi. Essi sono, come si suol dire, duttili e malleabili: due delle loro proprietà che li rendono cosí utili. Risulta possibile far scorrere un metallo solido come un fluido viscoso. L'oro può venir battuto in fogli cosí sottili che il metallo di una moneta d'oro da cento lire è sufficiente per coprire un grande prato; anche gli altri metalli citati si possono ridurre in fogli sottilissimi. Coppe e vassoi d'ogni tipo, catene, ornamenti ed una infinità di cose utili vengono fabbricati approfittando di queste due singolari ed importanti proprietà.

La prima cosa che vorremmo aver chiarita dai raggi X è la seguente: qual è la caratteristica strut-

turale dei cristalli metallici che spiega queste due preziose proprietà? Vorremmo anche capire l'intima ragione della tempera e di altre variazioni dovute alla cosidetta lavorazione a freddo, nella quale cioè il metallo viene trafilato, laminato, ecc. allo stato freddo. E che cosa è la ricottura, la diminuzione della durezza e delle tensioni interne che si ottengono col calore? Perché tutti questi fenomeni si verificano nel caso d'un metallo e non per esempio col diamante, salgemma o quarzo?

Orbene: siamo già riusciti a fare un po' di luce su queste difficili questioni ed in particolare a scoprire qualche cosa intorno al modo col quale il metallo cede ad una trazione o ad un'altra sollecitazione qualsiasi; oggi sappiamo che ciò è connesso con la disposizione a strati di cui abbiamo parlato.

Un pezzo di metallo è raramente costituito da un unico cristallo: bensí in generale da un aggruppamento di cristalli variamente orientati. Talora questi cristalli sono senz'altro visibili; talora invece bisogna ricorrere all'aiuto del microscopio. Molto spesso però essi sono troppo piccoli anche per il microscopio e solo i raggi X riescono a svelarli.

Se versiamo dei pallini da caccia su un vassoio e scuotendo leggermente quest'ultimo facciamo in modo ch'essi si dispongano in un solo strato e si raccolgano, inclinando il vassoio, in un angolo di questo (fig. A, tav. XXIV), possiamo osservare che

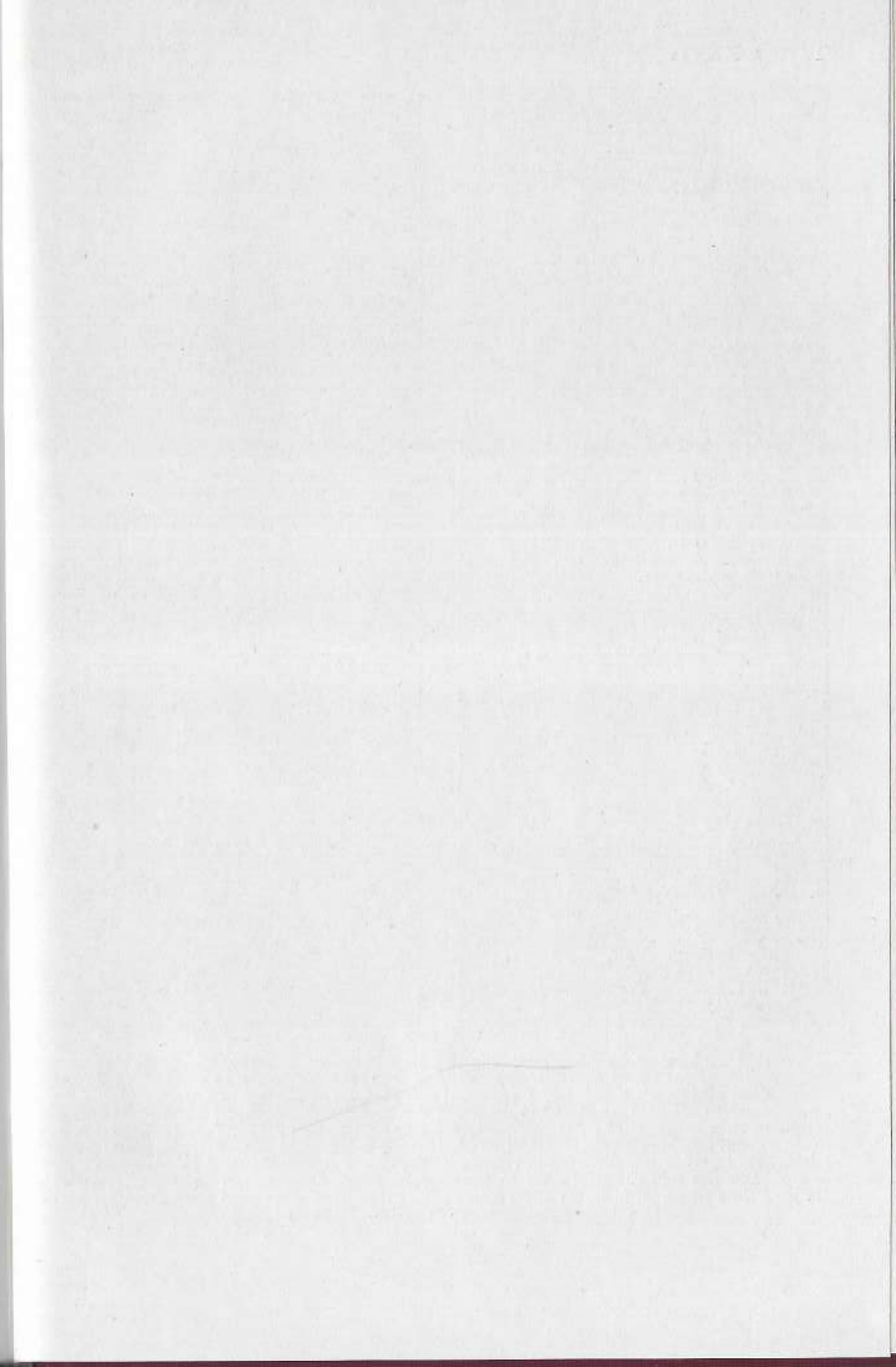
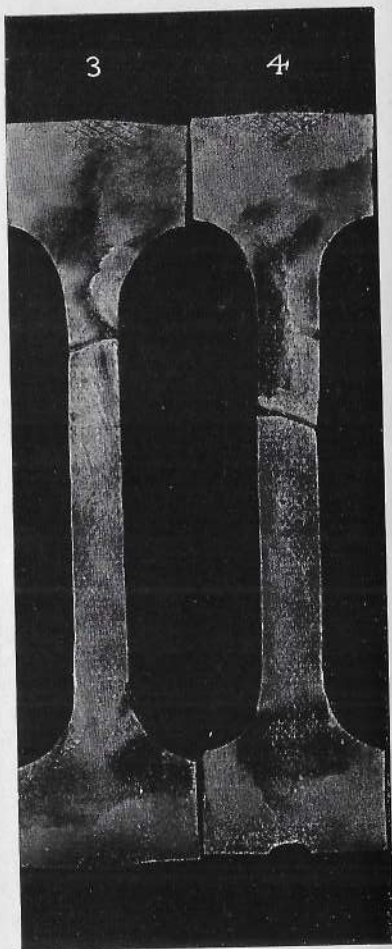
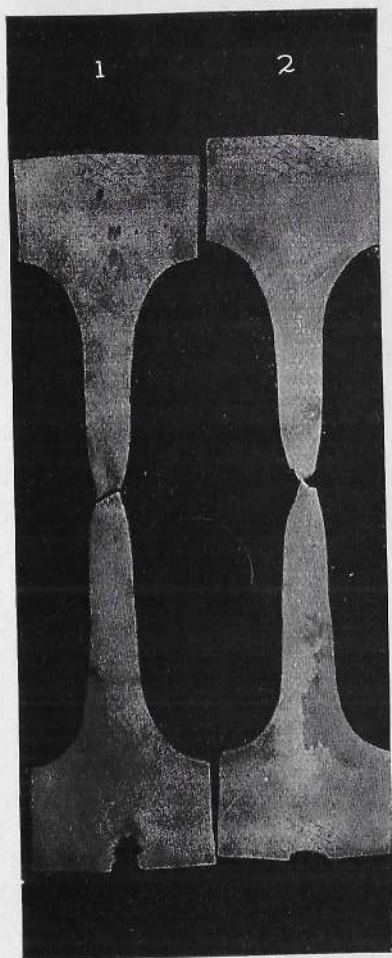
essi hanno la tendenza di accomodarsi come le palle in fig. 53. Avverrà raramente che tutti i pallini si assestino a formare una sola regolare disposizione: si formeranno piú spesso dei gruppi vicini. In modo del tutto analogo si raggrupperanno localmente gli atomi di un metallo; in altre parole: avrà luogo una cristallizzazione per gruppi atomici piú o meno grandi, mentre la connessione fra i varii gruppi risulta alquanto irregolare. Osserviamo subito che il legame fra gruppo e gruppo non è necessariamente piú debole di quello degli atomi in uno e medesimo gruppo. Il perché sia cosí è difficile dire. Non dobbiamo meravigliarcene, perché i legami fra gli atomi sono una cosa complicata ancora imperfettamente conosciuta e non possiamo predire esattamente ciò che avverrà in ciascun singolo caso.

Si dice che, quando si produce una frattura in un pezzo d'oro a temperatura elevata, essa contorni i cristalli, mentre, se l'oro è freddo, passi attraverso ad essi; basta quest'accenno per dimostrare quanto sia complicato un tale fenomeno.

Da quanto precede, è ragionevole attendersi che un blocco di uno di questi metalli consti di un gran numero di cristalli, grandi o piccoli; invero i raggi X confermano questa ipotesi, pure in quei casi nei quali il microscopio fallisce perché i cristalli rimangono invisibili anche col suo mezzo.

Se ora prendiamo un cristallo unico e cerchiamo di piegarlo o di torcerlo, troviamo sempre ch'esso cede finalmente per scorrimento lungo un piano: la parte che si trova da una banda di questo piano scorre rispetto alla parte che si trova dall'altra banda del piano. Questo è uno di quelli di cui abbiamo parlato, nei quali gli atomi sono disposti come in fig. 53. Un pezzo di metallo formato da un unico cristallo non cede esattamente nella direzione nella quale è sollecitato a trazione. Se due blocchetti, supponiamo di vetro, aderissero insieme mediante un po' di grasso come in fig. 55 (*a*) e venissero sottoposti ad uno sforzo di trazione, essi cederebbero slittando lungo il loro piano di separazione. È evidente ch'essi si comportano in questo modo piuttosto di venire ridotti in pezzi. Nel caso di un metallo, non abbiamo soltanto uno ma tanti piani, di cui molti sono piani di slittamento, lungo i quali questi slittamenti possono avvenire contemporaneamente oppure successivamente. Possiamo rappresentare il cristallo con una serie di righe come in fig. 56 (*a*) il cui complesso, sottopo-

FIG. 55. I due blocchi sono attaccati insieme, ma possono slittare l'uno sull'altro. Se sottoposti a trazione, la loro posizione reciproca cambia da quella in (*a*) a quella in (*b*).

TAVOLA XXVI.

Queste fotografie sono state tolte da una monografia del prof. Carpenter e signorina Elam «*Proceedings of the Royal Society*». Serie A. Vol. 100 (pag. 346). Esse mostrano il modo nel quale l'alluminio cede a sforzi di trazione. Il punto nel quale alla fine avviene la rottura è un singolo grosso cristallo situato nella parte piú stretta del provino. In (1) e (2) i piani di slittamento sono orientati rispetto all'osservatore come gli strati in fig. 56. Dalle fotografie si vede come il provino sia andato dapprima diminuendo di larghezza fino a contrarsi decisamente nel punto in cui è poi avvenuta la rottura. Il provino non si è assottigliato nel senso perpendicolare alla figura. In (3) e (4) ha invece avuto luogo l'opposto: la larghezza è rimasta la medesima anche dopo la rottura, mentre invece il provino si è assottigliato nel senso perpendicolare alla figura (non visibile nella fotografia).

sto a trazione, si deformi come in fig. 56 (*b*). Sovente, quando un cristallo unico è stato tirato ed allungato, si possono scorgere sulla sua superficie le linee lungo le quali hanno avuto luogo gli scorrimenti.

Il professor Carpenter e la signorina Elam hanno ottenuto dei bellissimi esempi di questo fenomeno nel caso di grossi cristalli di alluminio. Un pezzo ordinario di questo metallo consta di una moltitudine di cristalli orientati in tutti i sensi, come abbiamo già chiarito in precedenza. Mediante un processo abbastanza complicato di riscaldamenti e stiramenti, questa moltitudine di piccoli cristalli può venire indotta ad allinearsi ed a raccogliersi in un piccolo numero di grossi cristalli. Ricorrendo per analogia al nostro vassoio ed ai nostri pallini della fig. A in tavola XXIV, possiamo immaginarci che, scuotendo o battendo sul vassoio in modo conveniente, sia possibile indurre i varii piccoli regolari gruppi di pallini a riunirsi in un unico grande gruppo.

FIG. 56. Schema per lo scorrimento reciproco degli strati in un cristallo d'alluminio.

I pezzi scelti per l'esperienza avevano una forma cui si ricorre sovente per i saggi da sottoporre alle prove di resistenza alla trazione; essa è visibile nella

tav. XXVI; la lunghezza primitiva di tutti i provini era di venti centimetri; le estremità allargate o teste dei provini occorrono affinché la macchina di prova possa bene afferrare i provini per le loro estremità; la zona mediana piú ristretta del provino è quella che è destinata a cedere. Dal modo col quale ciò avviene e dalla misura dello sforzo di trazione applicato, si giudica sull'attitudine del metallo a resistere alle forze che lo deformano.

Ciascuno dei provini cosí preparati, sottoposto alla prova di trazione, si comporta in modo curioso, diverso da provino a provino (tavola XXVI fig. 1 a 4). Talora la larghezza del provino non si altera, mentre s'allunga e s'assottiglia man mano sotto lo sforzo; prima di rompersi può allungarsi di parecchi centimetri. Talora invece lo spessore rimane costante mentre il provino si contrae in larghezza; si sviluppa un restringimento che finalmente dà luogo alla rottura. Altre volte ancora si verificano dei cambiamenti ancora piú strani. L'esame di questi pezzi ai raggi X dimostrò che il modo col quale il provino cede dipende unicamente dall'orientazione dei grossi cristalli rispetto alla direzione dello sforzo di trazione. Il metallo cede lungo piani di slittamento. Se, per esempio, il cristallo è orientato in modo che gli strati di cui abbiamo parlato sieno disposti come in fig. 56, durante la deformazione il provino si restringerà in lar-

ghezza. Né è possibile predire durante il trattamento preliminare di riscaldo e stiramento quale sarà l'orientamento che assumeranno i grossi cristalli in formazione.

Qualche volta la direzione nella quale il cristallo cede dipende da un piú complicato ed alternato uso

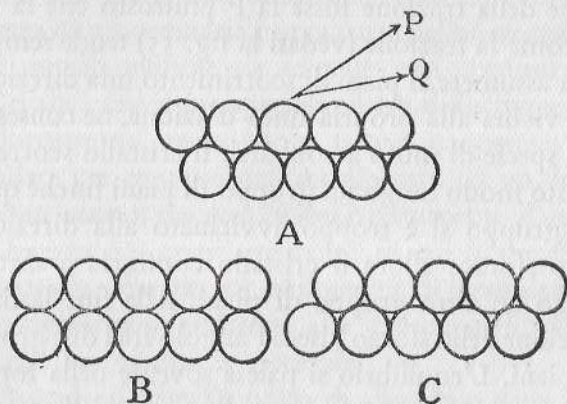



FIG. 57. Strati di palle. Lo strato superiore debba traslarsi dalla posizione A alla C attraverso B, il che avviene piú facilmente con una trazione secondo P che secondo Q.

di due serie di piani cristallini di slittamento. Quando il cristallo ha disponibile piú di una serie di piani per lo scorrimento, esso tende a scegliere quella serie che è piú perpendicolare alla direzione dello sforzo di trazione. Possiamo supporre che ciò avvenga perché lo slittamento significa lo scavalcamento degli atomi d'uno strato da parte di quelli di un altro strato, movimento che viene facilitato quando esi-

ste una forza che tende a staccare uno strato dal successivo. Se avessimo un corpo solido formato da una serie di palle come lo strato superiore della fig. 57 e giacente su di una serie analoga formante lo strato inferiore, potrebbe forse risultare piú facile far strisciare l'un strato sull'altro qualora la direzione della trazione fosse la P piuttosto che la Q. Siccome la trazione (vedasi la fig. 55) tende sempre a far assumere ai piani di scorrimento una direzione piú vicina alla propria linea d'azione, ne consegue una specie di moto a sobbalzi; il cristallo scorre in questo modo lungo un gruppo di piani finché questo gruppo si è troppo avvicinato alla direzione dello sforzo; allora il cristallo comincia a slittare lungo un altro gruppo di piani. Alla fine la linea d'azione dello sforzo biseca l'angolo fra i due gruppi di piani. L'equilibrio si palesa sovente nella forma della rottura; per esempio nella fig. 3 della tavola XXVI esiste una specie di triangolino nel punto di rottura. I due spigoli del triangolino sono paralleli a due differenti serie di piani di scorrimento e sono egualmente inclinati rispetto alla linea d'azione dello sforzo di trazione, che finalmente strappa il metallo in due.

L'alluminio è cosí cedevole che una lamina di qualche spessore, quando è costituita da un cristallo unico, si può piegare con ogni facilità con le dita. Per contro una lamina d'alluminio ordinaria

è del tutto rigida; la spiegazione è la seguente: quando vi sono dei cristalli orientati in tutti i sensi, ne esistono sempre taluni pronti a resistere allo sforzo esterno, non importa quale direzione abbia. La resistenza di una catena dipende da quella della sua maglia piú debole e la parte piú debole di un cristallo è il suo piano di scorrimento. Questo è un punto di straordinaria importanza nella lavorazione dei metalli sebbene sia sovente cosí confuso con tanti altri, che il suo speciale effetto si distingue difficilmente dal resto. Molti fattori cooperano per rendere per esempio dell'acciaio atto ad un determinato scopo; ma uno di essi è certamente il grado di finezza dei grani cristallini di cui il metallo è composto. Finezza ed uniformità di granulazione contribuiscono ambedue alla tenacia dell'acciaio ed alle sue qualità in generale.

Quando il cristallo unico di alluminio slitta lungo uno strato, ci dev'essere un momento nel quale l'una serie d'atomi scavalca l'altra serie di atomi ricadendo di nuovo in una posizione analoga alla primitiva: nella fig. 57 gli atomi dello strato superiore passeranno dalla posizione A alla C attraverso la posizione B. Avvenuto ciò, si ha di nuovo l'assestamento compatto di prima. Il metallo è sempre ancora un cristallo unico. Ora noi sappiamo che la disposizione cristallina regolare è quella piú naturale, e cosí la sostanza slitta facilmente da una di-

sposizione regolare nell'altra, mentre si adatta alla sollecitazione esterna. Questa è senza dubbio una delle cause, ed una delle piú importanti, della duttilità.

Ma perché un metallo diventa spesso piú duro quando lo si martella? E che cosa avviene quando lo si ricuoce? Forse può servire di guida, per rispondere, la considerazione di ciò che ha luogo quando l'oro viene battuto in foglie e poi ricotto. Le foglie d'oro sono molto sottili, come sappiamo; sono anche trasparenti, ma assorbono una parte dello spettro della luce che le attraversa, lasciando passare solo una luce verdastra. Osservate alla luce riflessa appaiono gialle, come è noto. È curioso che quando si scaldano al calor rosso scuro diventano permanentemente trasparenti, e bianche alla luce riflessa.

Faraday s'interessò molto di questo fenomeno; egli ne suggerí come possibile spiegazione la seguente: il sottile foglio di metallo riscaldato si rompe, nel senso che l'oro si raccoglie in piccoli mucchietti lasciando passare la luce fra le maglie della specie di setaccio cosí formatosi. Sir George Beilby eseguí molte esperienze in proposito, contribuendo considerevolmente alla nostra conoscenza riguardo al comportamento di questa e di altre sostanze quando riscaldate nello stesso modo. Secondo Beilby, se nella foglia d'oro cosí trattata si formano dei fori, questi debbono essere straordinariamente pic-

coli, al di là del limite di percezione microscopica.

Ora i raggi X hanno qualcosa da dire intorno alla questione. Quando dell'oro in foglia viene esaminato con il loro aiuto, si trova ch'esso consta di ammassamenti di cristalli cubici d'oro tutti giacenti con facce parallele alla superfice della foglia. Questi cristalli non sono tutti necessariamente cubici; constano, come quelli dell'ordinario sale da cucina, che è cubico, di blocchetti rettangolari di ogni grandezza. Questi blocchetti debbono essere straordinariamente sottili e non vi è dubbio che il loro spessore sia assai minore della loro larghezza o lunghezza. Quando la foglia è stata riscaldata, i blocchetti s'agglomerano in qualche modo, senza ordine; forse si raccolgono fino ad un certo grado in mucchietti, come supponeva Faraday, se pure troppo minuti per essere visti al microscopio; e forse è questa la ragione per cui l'oro e l'argento in foglie diventano trasparenti quando riscaldati. Perché poi l'oro diventi verde per trasparenza non si capisce. Ma ora sappiamo che la battitura distende i blocchi cristallini in modo che questi vengono a trovarsi tutti con una faccia parallela alla superfice della foglia, e che il calore distrugge questa in certo qual modo regolare disposizione. Quando la foglia d'oro, dopo riscaldata, viene premuta con un oggetto dalla superfice dura e piana, per esempio un pestello d'agata, essa ritorna nelle condizioni di pri-

ma, come era da aspettarsi, poiché la pressione costringe di nuovo i blocchetti a disporsi parallelamente alla superficie della foglia. In ambedue i casi il metallo è cristallino, ma nella forma usuale dell'oro in foglia l'assestamento dei cristalli è piú regolare che allo stato ricotto. Lo stesso effetto è mostrato dall'argento. Per ottenerlo anche nel caso del rame, sarebbe necessario di eseguire l'esperienza in modo che l'aria non possa agire sul metallo. Quando si scalda del rame all'aria, esso si copre rapidamente con una pellicola d'ossido di rame, un processo che si può pure studiare con i raggi X. Si vede sovente formarsi lentamente questa patina sul rame anche senza il concorso del calore. Ma è facile dimostrare con i raggi X che nel rame in foglie esiste la stessa disposizione di blocchi cristallini come nelle foglie d'oro. D'altra parte un blocco di rame ordinario non palesa questo assettamento: i cristalli sono orientati senza regola alcuna.

L'indurimento di questi metalli in seguito alla loro lavorazione a freddo è perciò dovuto in certo modo al fatto che il riordino dei cristalli, rivelabile ai raggi X, li pone in uno stato di tensione interna; il rinvenimento del metallo consta allora nell'eliminazione di questo stato di tensione e nella distruzione del riordino. Sul perché di questi fenomeni siamo ancora assai poco informati: dobbiamo già essere contenti d'aver fatto un piccolo passo innanzi.

Merita di ricordare che i metalli, quando si trovano in queste condizioni di tensione, vengono in generale piú facilmente attaccati dai reagenti chimici di quanto sarebbe da attendersi in base al loro comportamento usuale. Sembrerebbe che il metallo non si trovi, per cosí dire, a suo agio.

Passeremo ora a considerare altre particolarità possedute dai metalli, e poiché ci attendiamo già ch'esse risalgano tutte piú o meno alle stesse cause le tratteremo tutte insieme. Due delle proprietà piú salienti dello stato metallico sono la conducibilità per il calore e quella per l'elettricità. La rapidità con la quale si propaga il calore nei metalli ci è ben nota: saremmo quasi indotti a dire che un metallo potrebbe venire identificato per questa sua peculiare proprietà. D'altra parte sappiamo perfettamente che i metalli, specialmente il rame, vengono usati quali conduttori della corrente elettrica.

Ritornando a quanto abbiamo già detto intorno alla natura degli atomi ed alle differenze fra di essi esistenti, riscontriamo tosto una caratteristica che in complesso sembra atta a darci una spiegazione soddisfacente della conducibilità dei metalli; caratteristica che ha, senza dubbio, stretta relazione con la loro struttura cristallina e la loro duttilità. Gli atomi dei metalli possiedono sempre uno o piú elettroni debolmente legati all'atomo. Per esempio il sodio ha undici elettroni intorno al nucleo; due

sono molto vicini a quest'ultimo, otto formano una specie di guscio assai stabile, esterno ai precedenti; l'undicesimo elettrone appartiene ad un altro gruppo piú esterno ancora che si completa man mano passando dal sodio al magnesio (due elettroni), all'alluminio (tre elettroni), e cosí via. Tale elettrone residuo, cosí lontano dal nucleo, non ne viene trattenuto con molta energia: se per una ragione qualsiasi l'atomo ne viene privato, questo assume esternamente l'aspetto di un atomo di gas neon, di cui conosciamo la poca socievolezza; con la differenza però che l'atomo di sodio è ora affetto da una carica elementare positiva d'elettricità, dovuta alla perdita di un elettrone negativo, perdita che ha tolto l'atomo dalla sua neutralità elettrica.

Un cristallo d'alluminio è un aggregato di atomi simili al neon e che in prima approssimazione supponiamo sferici; nel compatto assettamento di questi atomi gli elettroni sovrabbondanti, quelli cioè che si staccano facilmente dal resto dell'atomo, possiedono una piú o meno grande libertà di muoversi attraverso il reticolo cristallino. Dobbiamo comunque tener presente che questa immagine è troppo grossolana per rappresentare l'intera verità: il nostro abbozzo manca di particolari su cui ancora nulla sappiamo. Tuttavia fino ad un certo punto siamo autorizzati a ritenerci nel vero. Comprendiamo allora subito perché i metalli sono dei buoni

conduttori dell'elettricità: perché gli elettroni, che sono i rappresentanti fondamentali dell'elettricità negativa, possono fluire agevolmente nel loro interno. Quando una corrente elettrica scorre in un filo metallico, sono gli elettroni quelli che si muovono; ed è curioso che la direzione del loro moto è proprio l'opposta di quella convenzionalmente adottata dagli elettricisti. L'espressione « corrente elettrica » era sempre stata usata in passato per intendersi su un fenomeno di cui non si conosceva l'intima essenza; solo da pochi decenni si sa che qualche cosa si muove realmente nei conduttori, epperciò non deve recare sorpresa se la direzione dapprima assunta per la corrente elettrica è proprio l'opposta di quella reale.

Di conseguenza non ci dobbiamo rappresentare una batteria od una dinamo come dei produttori di elettricità, bensí come sistemi capaci di fare circolare degli elettroni già esistenti in un circuito e piú o meno liberi di muoversi. Analogamente la macchina a vapore od il motore elettrico di uno stabilimento fanno percorrere continuamente ad una cinghia un determinato circuito, senza con ciò produrre del cuoio.

Quando si riscalda un metallo, i suoi elettroni liberi sono dotati d'una agitazione piú intensa e possono sfuggire all'esterno del metallo. Degli elettroni escono in un flusso continuo dal catodo incande-

scente delle valvole termoioniche della radio e questa corrente elettronica è indispensabile per il funzionamento delle valvole.

Nel metallo caldo gli elettroni non possono vagare cosí facilmente come nel metallo freddo. Anche qui non è difficile escogitare una prima grossolana spiegazione. Possiamo infatti immaginarci che gli elettroni si aprano piú difficilmente la loro via nel reticolo atomico quando i rispettivi atomi sono dotati, in conseguenza del loro stato termico, di una maggiore agitazione, intralciando il deflusso degli elettroni. Meno facile è invece trovare il perché dello strano fenomeno scoperto da Kamerlingh Onnes di Leida, che talune sostanze quando si portano e si mantengono ad una temperatura estremamente bassa (diversa per ogni sostanza), non offrono piú alcuna resistenza al deflusso degli elettroni, sicché una corrente elettrica, una volta eccitata, continua a circolare per lungo tempo prima d'affievolirsi. Questo strano fenomeno è chiamato «superconduttività elettrica».

Gli elettroni devono poi, almeno fino ad un certo punto, contribuire all'attitudine del metallo a condurre il calore, oltre che l'elettricità, poiché gli elettroni all'estremità calda di una sbarra di metallo debbono pure cedere un po' della loro energia sovrabbondante a quelli che si trovano all'estremità fredda.

Cosí la presenza degli elettroni nel metallo, capaci di muoversi con una certa libertà fra gli atomi che costituiscono la sua ossatura cristallina, riesce a dare una certa spiegazione della sua conducibilità termica ed elettrica. Naturalmente questa spiegazione è assai grossolana: troppi particolari e troppi fatti importanti sono rimasti inconsiderati, di cui non ci rendiamo ancora bene ragione e che potrebbero indurci a modificare la nostra interpretazione di questi fenomeni.

Tornando ora alla questione della duttilità dei metalli vediamo se la presenza degli elettroni ci può essere qui pure d'aiuto. Abbiamo immaginato i nostri atomi come delle sfere cariche di elettricità positiva e strettamente agglomerati insieme; forse siamo nel vero supponendo che gli elettroni servano a tenerli insieme come un cemento. La cosa piú importante è però che gli atomi non sono legati l'un l'altro per il fatto di avere degli elettroni in comune, come nel caso del diamante: devono piuttosto respingersi l'un l'altro essendo tutti carichi d'elettricità del medesimo segno, cioè positiva. Essi sono liberi di rotolare o slittare gli uni sugli altri, perché non sono reciprocamente connessi in determinati loro punti come sovente avviene in altri cristalli. Questa rappresentazione può aiutarci nel capire lo slittamento di un piano cristallino sull'altro.

Finora abbiamo considerato la struttura cristallina e le proprietà di taluni metalli allo stato puro. In pratica abbiamo tuttavia assai piú sovente a che fare con leghe metalliche che con metalli puri e ciò perché le leghe presentano proprietà speciali di grandissima importanza. Le leghe sono infatti, per la loro straordinaria molteplicità e per la loro estesa utilizzazione, di estremo interesse per l'attività umana. Continuamente se ne inventano dei nuovi tipi. Quando per uno scopo qualsiasi viene richiesto un materiale di speciali proprietà, compare sul mercato una lega che risponde piú o meno completamente ai requisiti richiesti. Dobbiamo cercare, in base alle conoscenze finora acquisite, di spiegarci in qualche modo la ragione di questa svariatissima utilizzazione delle leghe. Certo, sappiamo ancora cosí poco intorno a questo soggetto e tante cose richiedono ancora d'essere chiarite, che fra non molti anni sorrideremo dei nostri tentativi attuali d'interpretazione; ma dobbiamo pure incominciare una buona volta.

Accade sovente che l'aggiunta ad un metallo di una piccola quantità di un altro metallo, oppure anche di un metalloide, è causa di un notevole incremento di durezza. I metalli puri sono in generale molto molli perché pronti a scorrere lungo i loro piani cristallini di slittamento. La prima lega di grande importanza per la storia dell'umanità fu

il bronzo, una miscela di rame e stagno che è molto piú dura di ciascuno di questi metalli presi da soli. Mescolando il rame con lo zinco si ottiene l'utilissimo ottone, le cui proprietà dipendono dalle proporzioni della miscela. Per ottenere l'acciaio al carbonio si aggiunge al ferro una piccola percentuale di quest'ultimo elemento. Esistono per esempio delle leghe di rame ed alluminio che sono assai tenaci e non corrodibili, ma che non sono però facili a gettarsi in forme. Si ha, come altro esempio, una lega di rame e nichel, resistentissima alla corrosione, di cui si possono invece ottenere facilmente dei getti; se ne fa uso per rivestire proiettili. L'alpacca è una lega bianca, duttile, resistente alla corrosione, di cui si fabbricano articoli come cucchiai, forchette, che si possono ulteriormente ricoprire d'argento ricorrendo alla « galvanostegia ». Una certa lega di nichel e cromo resiste ad altissime temperature e viene perciò adoperata per il filo di riscaldamento in stufe, forni ed altre applicazioni termoelettriche. Cromo, cobalto e tungsteno combinati in una certa proporzione dànno la stellite, un materiale straordinariamente duro e resistente alla corrosione, che si usa per gli utensili da taglio. Vi sono leghe per fondere campane, leghe dolci per caratteri da stampa ed una grande varietà di saldature. Esiste un bronzo d'alluminio largamente usato per oggetti ornamentali a buon mercato; consiste in alluminio

con una piccola percentuale di rame. E cosí via, con una lista che diventerebbe assai lunga se la si volesse completa.

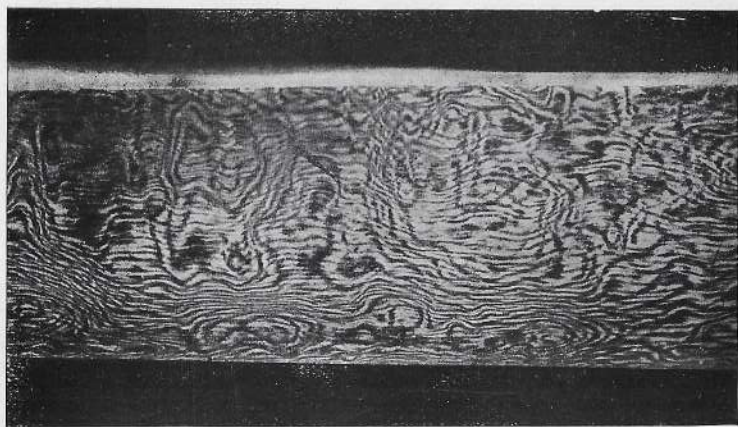
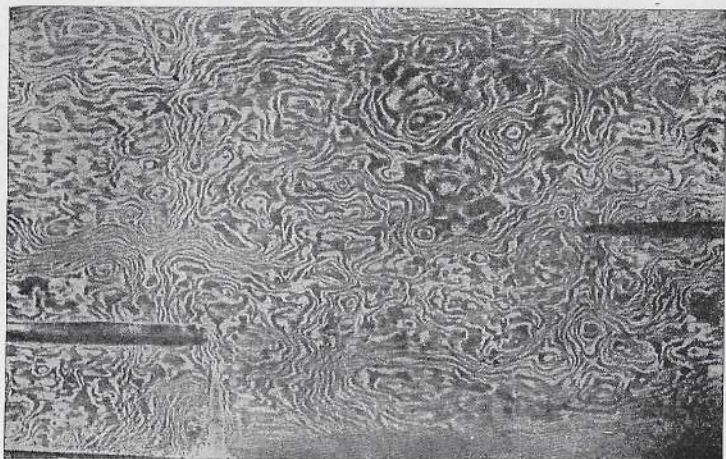
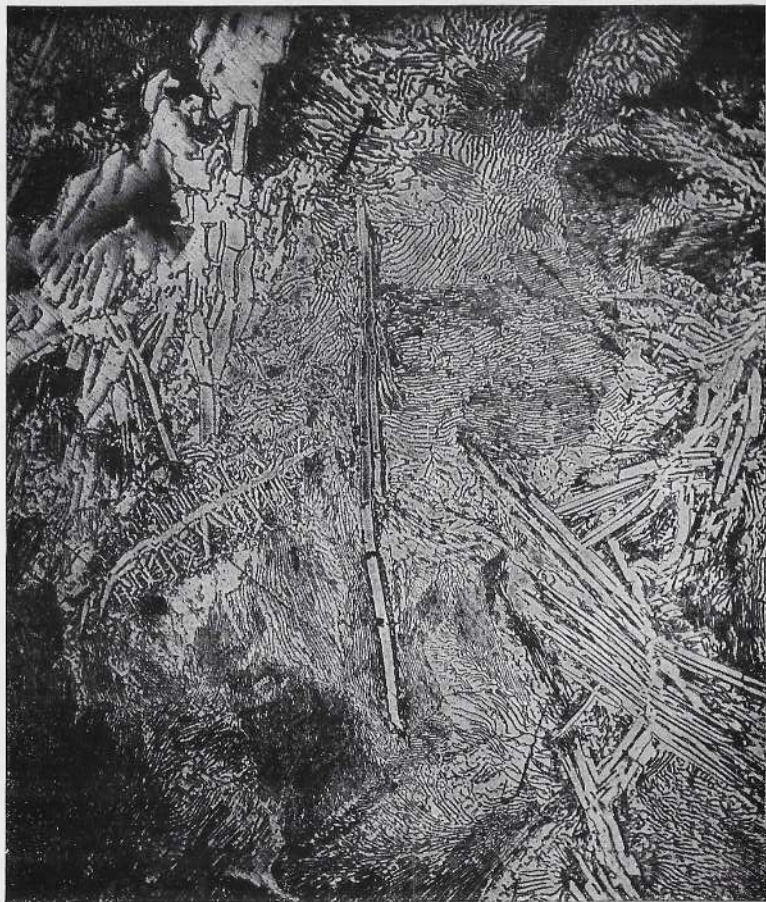
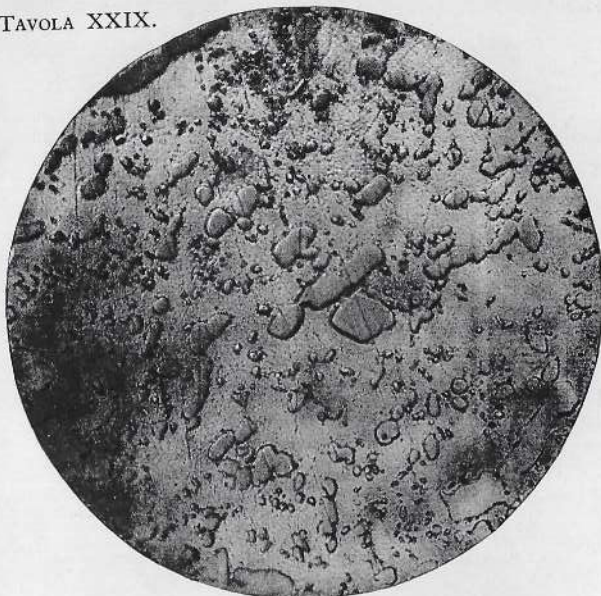
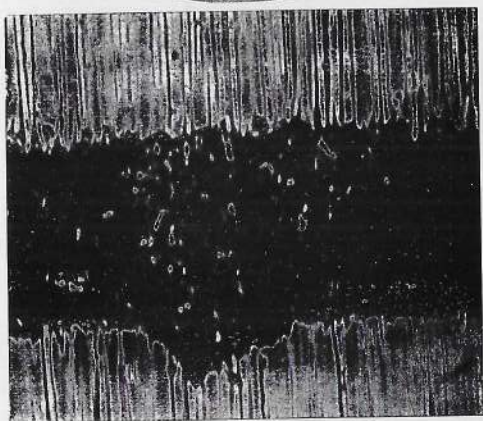
Fermiamo la nostra attenzione su uno dei casi piú semplici, per esempio quello nel quale l'aggiunta di una piccola quantità d'alluminio al rame produce un incremento di durezza. I raggi X rivelano che la struttura del cristallo di rame rimane invariata, salvo che qui e là un atomo d'alluminio occupa il posto di uno di rame. Ora la debolezza di un cristallo risiede, come abbiamo visto, nel fatto che una parte di esso slitta su di un'altra sua parte lungo un determinato piano. Questo piano non è ora piú piano: degli atomi d'alluminio si trovano sparsi in esso ed è lecito supporre che ciò renda piú difficile lo scorrimento quindi, con altre parole, piú duro il materiale. Conosciamo un fenomeno assai sorprendente che conforta la nostra ipotesi. Gli atomi d'alluminio debbono forzare la struttura del cristallo di rame, poiché questo non ne vuole accogliere piú di un certo numero. Se la percentuale dell'alluminio nella lega supera il 10% i raggi X rivelano che i cristalli di rame si sono completamente disfatti dando luogo ad una nuova struttura cristallina. Gli atomi d'alluminio debbono deformare i cristalli di rame, ciò che s'accorda molto bene col fatto ch'essi induriscono il rame. D'altra parte, quando si aggiunge del nichel al

Lame di damasco.
(Dal « BELAJEW: *Crystallisation of Metals* »).

TAVOLA XXVIII.

I lunghi corpi aghiformi sono cristalli di cementite, facenti parte della massa generale dell'acciaio.

(Dal «BELAJEW: *Crystallisation of Metals*»).

TAVOLA XXIX.

A. Struttura della cementite.

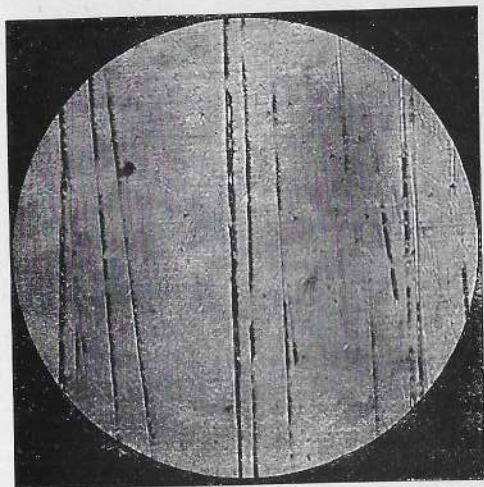
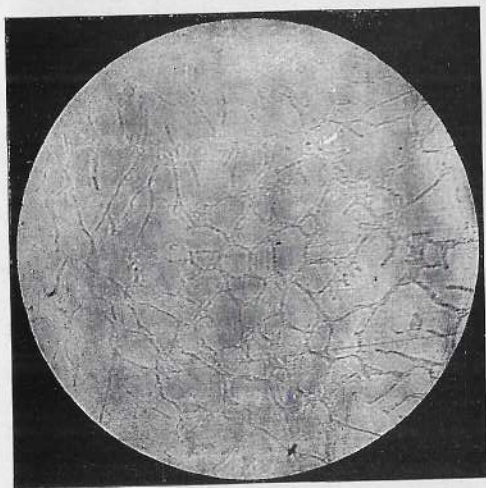
Sezione d'un pezzo d'acciaio ingrandita un migliaio di volte e mostrante gli aghi di cementite in procinto di disfarsi ed arrotondarsi.

(Dal « BELAJEW: *Crystallisation of Metals* »).

B. Superficie polita di metallo speculare, fortemente ingrandita.

La fascia scura trasversale è la traccia di una rigatura fatta con un ago finissimo. Le fini righe verticali sono dovute alla polvere di smeriglio nella pulitura. Molte piccole particelle sono state staccate e depositate nel solco prodotto dall'ago.

(Dal « BEILBY: *Aggregation and Flow of Solids* »).

TAVOLA XXX.

In A si vede la superfice levigata trattata con smeriglio finissimo indi ripassata con la pelle. Il metallo è stato portato nelle rigature; analogamente ad una spalmatura di burro sul pane. In B la ripassatura all'ossido di ferro è stata spinta piú avanti, le rigature dello smeriglio sono scomparse mentre cominciano a comparire i contorni dei grani cristallini del metallo.

(Dal « BEILBY: *Aggregation and Flow of Solids* »).

rame, gli atomi del primo rimpiazzano quelli del secondo in qualsiasi proporzione: evidentemente gli atomi di nichel possono insinuarsi al posto di quelli di rame senza causare una deformazione dei cristalli. In questo caso l'indurimento è relativamente piccolo, come appunto dovevamo presumere. Solo costringendo i cristalli di rame ad accogliere atomi che realmente lo deformano e ne irruvidiscono i piani, possiamo ottenere un indurimento. Detto altrimenti: abbiamo inchiavettato i piani di scorrimento.

Con l'acciaio l'effetto in sostanza è il medesimo, solo che qui sono gli atomi di carbonio a produrre l'indurimento, non sostituendosi al posto degli atomi di ferro, bensí forzandosi negli spazi vuoti fra di essi. Se ne può facilmente dedurre una deformazione del cristallo di ferro e, come sopra, un impedimento al moto lungo i piani di scorrimento. Ancora una volta troviamo un limite d'assorbimento per gli atomi entranti in lega: infatti solo una piccola percentuale di carbonio si può aggiungere al ferro senza distruggere l'usuale semplice struttura cristallina di quest'ultimo.

Il problema del ferro e dell'acciaio comprende tuttavia complicazioni assai piú numerose di quelle finora considerate. Basta domandarci, per esempio, che cosa accade quando si aggiunge piú carbonio di quanto la struttura cristallina del ferro può ac-

cogliere, per trovarci di fronte ad un nuovo problema. Si forma tra l'altro un nuovo tipo di cristallo costituito da molecole aventi ciascuna tre atomi di ferro ed uno di carbonio; questo composto si chiama «cementite». I nuovi cristalli sono molto duri e rigidi e si presentano in forme di aghi (tavola XXVIII). Essi rendono il ferro molto duro e piú difficile di lavorazione. Un bellissimo esempio del loro effetto sull'acciaio è offerto dalle antiche spade che dall'India trovarono, attraverso Damasco, la via dell'Europa. L'acciaio damascato era tenuto in gran conto per le sue ottime qualità. Le lame conservate nelle collezioni mostrano i caratteristici disegni fiammeggianti (Tav. XXVII) che si consideravano come una prova della loro genuinità. Osservate al microscopio, le linee dei disegni si risolvono in una moltitudine di punti formanti una specie di «via lattea» nell'acciaio. Questi punti rappresentano i minutissimi cristalli di cementite.

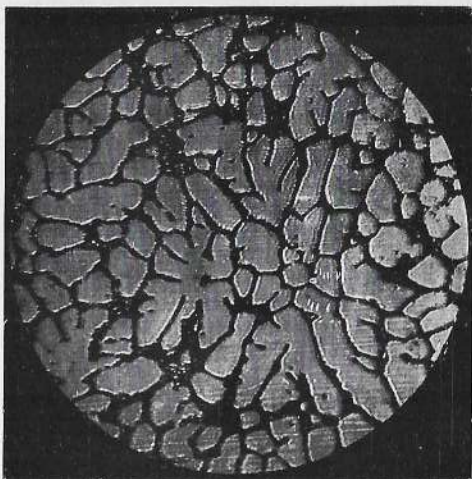
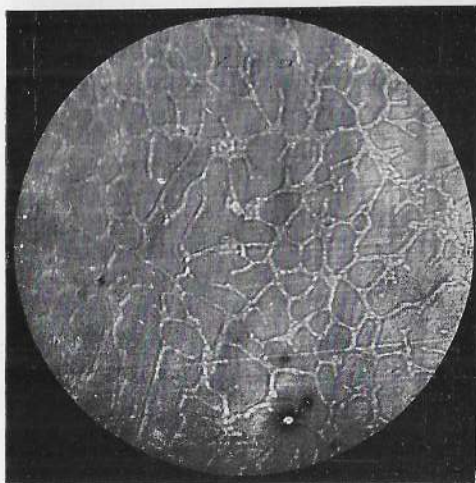
Come c'informa il Belajew, l'acciaio damascato era dapprincipio assai difficile a lavorarsi. L'artefice scaldava sulla sua piccola fucina l'acciaio al calor rosso, ma dopo pochi colpi di martello l'acciaio era già freddo e la malleabilità scomparsa. La durezza impartita all'acciaio dai cristalli di cementite veniva rimossa per pochi istanti. Nuovo riscaldo, altri colpi di martello, e lentamente l'acciaio perdeva

la sua rigidezza. Infatti i cristalli di cementite cambiavano di forma: da quella aghiforme si raccoglievano in forme piú rotonde; e nella misura che questo succedeva, l'acciaio diventava piú flessibile (Tav. XXIX A). Finalmente usciva dalle mani dell'artefice la fine lama damascata, cosí robusta eppure tanto flessibile. È assai probabile che il taglio finissimo caratteristico di quest'arma sia in gran parte dovuto alla presenza delle durissime particelle di cementite incorporate nel ferro piú dolce e da questo sostenute. Il filo della lama sarebbe paragonabile ad una sega dai denti minutissimi. Nella gara di destrezza fra Saladino e Re Riccardo descritta da Walter Scott nel suo *Talismano*, il primo getta in aria un velo e lo taglia in due con un colpo della sua scimitarra dimostrando l'affilatezza della sua lama e la propria abilità. D'altra parte, Re Riccardo usando la spada come un'ascia spacca in due la mazza ferrata di un suo cavaliere. Anche questa è una bella prova richiedente un'ottima qualità d'acciaio, ma dimostra nell'uomo piú l'abilità d'assestare un formidabile colpo che non finezza nel maneggio della spada.

Il molare, affilare e pulire sono veramente delle operazioni assai interessanti. Quando appoggiamo la lama di un coltello sulla mola da affilare, permettiamo ai durissimi cristalli della pietra di incidere dei minutissimi solchi nell'acciaio, asportando del

materiale. Questo è il primo stadio del processo d'affilatura. Invece la ripassatura sulla pietra oliata oppure la cute è qualche cosa del tutto differente. Qui si induce realmente l'acciaio a fluire, spianando i solchi. Sir George Beilby ha dimostrato che in seguito a questa operazione i solchi piú profondi risultano talora coperti da una sottile pellicola di metallo. A quanto sembra, questo rimane sempre cristallino ed infatti i raggi X dimostrano con facilità l'esistenza dei cristalli in una lama di rasoio. Probabilmente il processo è quello stesso che si verifica nelle foglie d'oro quando riscaldate. L'olio che usiamo aiuta la levigatura. Nel metallo si produce uno stato di tensione in seguito al suo fluire: col tempo questo stato di tensione tende a scomparire e specialmente il calore toglie al filo la sua affilatezza (tavole XXIX B, XXX, XXXI).

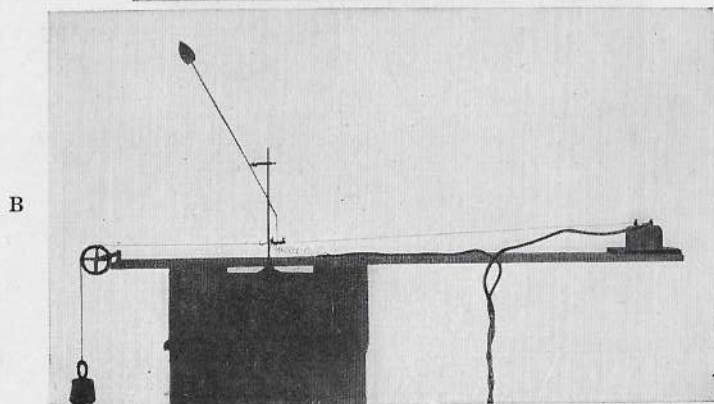
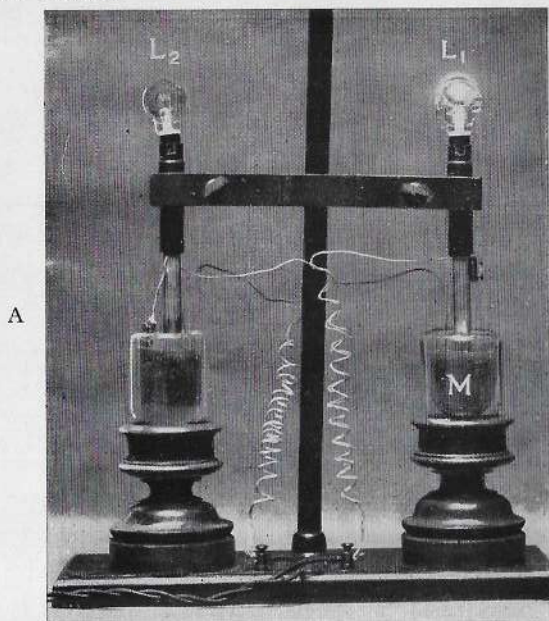
Le leghe sono in generale dei conduttori assai meno buoni dell'elettricità che non i metalli puri. Può darsi che quando gli atomi estranei s'incuneano nella struttura del metallo puro e i piani cristallini s'irruvidiscono, gli elettroni vengano maggiormente intralciati nella loro migrazione entro il metallo. Per farli procedere occorre spendere una maggior quantità d'energia ed il metallo si riscalda al passaggio della corrente assai piú che se fosse puro. Come abbiamo già fatto osservare, la resistenza elettrica di un metallo puro cresce con l'au-

TAVOLA XXXI.

Metallo speculare.

In A il metallo è stato attaccato con un acido; le particelle fluite sono state facilmente attaccate ed eliminate; i grani cristallini sono ora assai chiaramente distinguibili. In B si è ricominciato a ripassare con la pelle.

(Dal «BEILBY: *Aggregation and Flow of Solids*»).

A

B

Variazione della resistenza con la temperatura.

A. In M un rocchetto di rame, nel recipiente di sinistra uno di argentana, aventi la stessa resistenza. Le lampade L_1 ed L_2 brillano ambedue con ugual intensità luminosa. Si versa dell'aria liquida in entrambi i recipienti: la luce della L_2 rimane invariata, mentre aumenta l'intensità luminosa della L_1.

B. Un filo di ferro teso da un peso; la sua dilatazione in seguito al calore prodotto da una corrente elettrica che lo percorre viene rapportata in scala maggiore dal dispositivo a leva con relativo indice.

mentare della temperatura. Questo fenomeno si può interpretare supponendo che gli elettroni trovino maggiore difficoltà d'insinuarsi fra gli atomi quando il calore mette quest'ultimi in maggiore agitazione. Nel caso delle leghe, invece, l'influenza del calore non è cosí sentita, poiché il deflusso degli elettroni è già cosí difficile che il calore non cambia molto a questo stato di cose. Possiamo illustrare quanto precede con una semplice esperienza.

Una batteria alimenti un circuito elettrico a due rami come nella fig. A di tav. XXXII. Uno dei rami passi per l'avvolgimento di filo di rame M e la lampada L_1; l'altro per un rocchetto identico, ma d'argentana, e la lampada L_2. La resistenza dei rocchetti al passaggio della corrente elettrica è regolata in modo che le due lampade s'accendano ambedue debolmente. Ora si prende un recipiente pieno d'aria liquida e vi si immerge il rocchetto M. Subito la lampada L_1 brilla di piú viva luce. Il raffreddamento del filo di rame del rocchetto M ha diminuita la sua resistenza al passaggio degli elettroni e la lampada è attraversata da una corrente maggiore. Se invece si immerge nell'aria liquida il rocchetto d'argentana, non si verifica alcun cambiamento di luminosità della lampada L_2.

Talvolta i metalli cristallizzano in piú di una forma. Il ferro ne fornisce uno degli esempi piú semplici e tipici. Alla temperatura ordinaria ciascun

atomo di ferro è circondato da altri otto atomi identici. Questi ultimi si trovano ai vertici di un minuscolo cubetto, al cui centro risiede il primo. Tale disposizione non è però la piú compatta, come si può facilmente dimostrare con l'esperienza. L'assettamento piú denso è quello delle palle di cui a pag. 218 in fig. 53 e fig. B in tavola XXIV. Ogni palla è circondata da dodici altre palle, di cui sei la toccano in un piano lungo un cerchio che chiameremo equatoriale ed altre sei, tre per parte, lungo un parallelo; detto altrimenti: nel proprio strato la palla è circondata da sei palle, e da altre tre in ciascuno dei due strati inferiore e superiore. In questo modo cristallizzano l'oro, l'argento, il rame, l'alluminio ed altri elementi. Curioso è il fenomeno che si verifica con il ferro: quando si riscalda questo metallo al rosso ciliegia, gli atomi cambiano assestamento, disponendosi nel modo piú compatto possibile, quello appunto del mucchio di palle della fig. B in tav. XXIV. Il fenomeno si può osservare facilmente scaldando un filo di ferro al di là di questo punto e lasciandolo raffreddare; alla temperatura critica gli atomi passano d'improvviso alla disposizione meno compatta ed il filo di ferro si allunga un po': l'incremento in lunghezza si rende maggiormente palese mediante un dispositivo magnificatore. Pure strano è il fatto che, quando il ferro passa da una forma all'altra di cristallizzazione, si libera una

certa quantità d'energia che ravviva improvvisamente l'incandescenza del filo di ferro. Tanto l'allungamento quanto l'illuminarsi del ferro furono lungamente oggetto di osservazione, ma solo da poco si è scoperto che la ragione di questi fenomeni risiede nell'assettamento degli atomi in due forme cristalline diverse (fig. B tav. XXXII).

Questi pochi esempi delle relazioni fra le proprietà e la struttura cristallina di un metallo appartengono ad un illimitato campo d'indagine che si sta continuamente esplorando, specie mediante i raggi X. Non possiamo dire in precedenza a che punto si potrà arrivare; ma una cosa è certa: piú conosceremo a fondo i nostri materiali e meglio potremo utilizzarli.

CAPITOLO SETTIMO

LE PIÚ RECENTI CONQUISTE

DALL'EPOCA in cui i precedenti capitoli furono scritti, sono trascorsi diversi anni; nel frattempo molti grandi progressi sono stati fatti nella nostra conoscenza della natura delle cose; siamo perciò in grado di poter aggiungere altre assai interessanti notizie intorno ai soggetti che abbiamo discusso. Ciò si riferisce specialmente alle ricerche sulla struttura dei corpi solidi per mezzo dei raggi X. In tal campo le esplorazioni hanno fatto un gran passo innanzi.

Uno dei piú importanti e piú vasti lavori eseguiti in questi ultimi tempi è la determinazione della struttura dei silicati e loro famiglia. Queste sostanze sono tra le piú diffuse sulla crosta terrestre, come si sa. Ricordiamo al proposito che circa la metà della nostra litosfera è fatta d'ossigeno ed un quarto di essa di silicio. Dobbiamo perciò attenderci che composti di ossigeno e silicio sieno molto frequenti: né saremo sorpresi di apprendere che rocce e minerali ben noti come quarzo, mica, feldspato, arenaria, asbesto e cosí via sono tutti basati su combinazioni d'ossigeno e silicio.

Ora si è trovato che una delle caratteristiche piú fondamentali della struttura di queste sostanze è data

dalle dimensioni relativamente grandi dell'atomo d'ossigeno. In realtà taluni minerali sono composti semplicemente da atomi d'ossigeno densamente agglomerati, con altri atomi situati negli interstizi fra i primi e funzionanti da cemento. Uno dei casi piú semplici di questo genere è costituito dall'ossido di berillio. Benché non sia un silicato, lo portiamo per primo come un esempio illustrativo della predominanza dell'ossigeno. Gli atomi di questo elemento sono qui impacchettati insieme come è mostrato nella fig. B della tavola XXV, che rappresenta quello che comunemente viene chiamato assettamento esagonale, e nella fig. 54 B. Se non ci fossero altri atomi che funzionano come cementanti, gli atomi d'ossigeno si distaccherebbero evidentemente gli uni dagli altri passando allo stato gassoso. Invece gli atomi di berillio impediscono loro di sfuggire, funzionando da legami. L'atomo di ossigeno ha la tendenza di completare il suo guscio piú esterno di elettroni che è solo di sei, mentre il guscio completo è di otto. Il berillio invece ha due elettroni periferici ch'esso cede volentieri, sicché i due atomi, ossigeno e berillio, entrano volentieri in combinazione.

L'ossido di berillio contiene un egual numero d'atomi delle due specie; esso sta insieme in conseguenza dell'attrazione fra gli atomi elettricamente positivi di berillio e quelli negativi di ossigeno. La

sua struttura cristallina è semplice. Nella fig. 54 B le palle nere, oppure le bianche che fa lo stesso, rappresentino degli atomi d'ossigeno. Intendendo che tutte le palle sono eguali, e che la distinzione in nere e bianche serve solo ad indicare che appartengono a strati differenti, vediamo che ciascuna palla nera (strato sovrastante) riposa su tre palle bianche (strato sottostante). Una palla nera e tre bianche racchiudono tra loro un piccolissimo vano, nel quale si trova insinuato un atomo di berillio, che è assai piú minuto di quello d'ossigeno.

Se invece del berillio sono degli atomi d'alluminio che collegano quelli d'ossigeno, abbiamo un cristallo di corindone, che colorato in rosso è quella gemma che si chiama rubino; la varietà azzurra forma invece lo zaffiro. Qui tuttavia esiste una interessante differenza rispetto alla semplice struttura cristallina dell'ossido di berillio. L'atomo di alluminio possiede nel suo guscio elettronico piú esterno tre elettroni che cede facilmente; due atomi ne dànno quindi sei; di conseguenza occorrono tre atomi d'ossigeno per accogliere questi sei elettroni e ristabilire l'equilibrio elettronico essenziale per la stabilità chimica del composto. Nel cristallo d'ossido di berillio vi sono tanti atomi di berillio quanti d'ossigeno poiché, come è rilevabile dalla fig. 54 B vista dall'alto, sotto ogni atomo di ossigeno se ne trova uno di berillio in ciascuno strato. Invece nel rubi-

no manca un atomo di alluminio sotto un terzo degli atomi d'ossigeno. Se per esempio consideriamo le palle nere della fig. 54 B dobbiamo cercare una disposizione regolare per la quale un terzo di esse non ha sotto di sé un atomo di metallo. Procedendo in tal modo si trova che le palle rimanenti, cioè quelle accompagnate da un atomo metallico sottoposto, formano un disegno ad esagoni, simile ad un reticolato. Con ciò resta completamente descritta la struttura cristallina del corindone.

Considerate queste due strutture, possiamo passare ai silicati. Qui si presenta un principio nuovo, fino a un certo punto in antitesi al predominio goduto dagli atomi d'ossigeno in seguito alle loro relativamente grandi dimensioni. Si tratta di un principio direzionale. L'atomo di silicio tende ad associarsi con quattro altri atomi e a disporli intorno a sé in modo regolare, cosí come nel diamante ogni atomo di carbonio è circondato da altri quattro atomi simmetricamente disposti intorno ad esso. Ma ciò non si può sempre conciliare con il semplice assestamento compatto degli atomi d'ossigeno. In parole povere: ogni volta che nella struttura cristallina vi sono degli atomi metallici che possano cedere degli elettroni all'ossigeno, prevale il principio dell'assestamento piú compatto proprio all'ossigeno, perché non esiste alcuna tendenza direzionale, bensí soltanto una semplice attrazione di ca-

riche elettriche di segno opposto. Invece quanto maggiore è la parte assunta dal silicio, tanto piú s'afferma la tendenza direzionale.

Nel quarzo, che contiene solo atomi d'ossigeno e silicio, questo principio direzionale è pienamente sviluppato e cosí si ha la nota struttura elicoidale che conferisce al quarzo le sue curiose proprietà. Questa struttura non è facile a capirsi senza un modello. Sarà sufficiente ricordare che gli atomi di silicio sono disposti, come in fig. 27 C_1 e C_2, secondo una spirale e che ciascuno di essi è contornato da quattro atomi d'ossigeno disposti all'incirca nei vertici di un tetraedro avente al centro l'atomo di silicio; ogni atomo d'ossigeno appartiene contemporaneamente a due di questi tetraedri sicché l'intera struttura è saldamente tenuta insieme. Sappiamo infatti che il quarzo è una sostanza durissima.

Strutture cristalline bellissime si trovano nei minerali consistenti in silicio, ossigeno, metalli e varii altri atomi; per esempio nel berillio, crisoberillio, olivina, mica e cosí via. In talune di queste strutture si hanno lunghe catene d'atomi d'ossigeno e silicio, sempre con un atomo di silicio al centro di un tetraedro avente in ciascun vertice un atomo d'ossigeno; ogni tetraedro essendo legato al vicino per il fatto che due tetraedri successivi hanno un atomo d'ossigeno in comune. Le catene giacciono lato a

lato ma non sono collegate insieme come nel quarzo per avere degli atomi d'ossigeno in comune fra tetraedri di catene differenti: d'altra parte esistono legami, fra le differenti catene, realizzati da atomi metallici. Ora tali legami non sono cosí robusti come le connessioni entro le catene stesse e conseguentemente la sostanza tende a dividersi in lunghi sottili frammenti. È il fenomeno che conferisce all'amianto il suo peculiare aspetto fibroso. Talvolta gli atomi di silicio e d'ossigeno formano delle scaglie con la medesima caratteristica disposizione tetraedrica dell'ossigeno ed anche qui i legami, costituiti da atomi metallici, fra scaglia e scaglia sono meno robusti di quelli all'interno delle scaglie medesime.

Un altro aspetto di queste strutture vale la pena di ricordare. Sebbene il tetraedro d'atomi d'ossigeno contenga usualmente ed appropriatamente al suo centro un atomo di silicio, talvolta quest'ultimo viene rimpiazzato da altri atomi, per esempio d'alluminio. L'atomo d'alluminio trattiene insieme i quattro atomi d'ossigeno come fa normalmente quello di silicio e la struttura non ne risulta materialmente alterata. Ma ora sorge una questione chimica; il silicio si associa con quattro atomi (monovalenti), l'alluminio con tre. Quindi ad ogni atomo d'alluminio sostituente uno di silicio, bisogna aggiungere in qualche modo un elettrone. Ciò avviene in via naturale mediante l'incorporazione

nella struttura cristallina di un atomo (monovalente) come il sodio oppure il potassio; od anche il calcio, ma questo essendo bivalente, potendo cioè fornire due elettroni, basta in ragione di un atomo per ogni due di alluminio. Gli atomi estranei incorporati in tal modo si possono rimuovere e rimpiazzare senza disturbare la struttura cristallina fondamentale; in realtà questa struttura cristallina si può trattare cosí come il chimico tratta un sale dal quale intende rimuovere l'atomo metallico per sostituirlo con un altro.

Questo principio viene per esempio applicato in un caso assai noto: precisamente per addolcire le acque. L'analcite ha una struttura analoga a quella or ora descritta; il suo atomo addizionale è il sodio. Quando questa sostanza viene introdotta in una acqua dura, parte degli atomi di sodio abbandonano l'analcite ed il loro posto viene preso dagli atomi di calcio dell'acqua. In tal modo l'acqua perde la sua durezza, diventa cioè piú dolce. Se poi si tratta l'analcite con una forte salamoia, ha luogo un parziale processo inverso. Il sodio scaccia il calcio e la sostanza rigenerata è di nuovo atta all'uso.

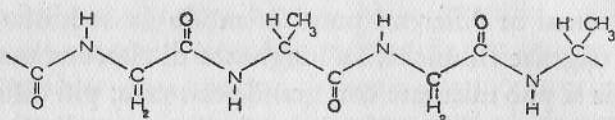
Rivolgeremo ora la nostra attenzione ai progressi che si sono verificati in tutt'altra direzione. Abbiamo appunto visto che certi peculiari assettamenti atomici conferiscono alle sostanze una caratteristica fibrosa, come nel caso dell'amianto. Essa è dovuta

invero alla coesistenza di tenaci legami in una direzione e di una debole coesione in altre direzioni. Tutti gli organismi che crescono presentano piú o meno una struttura fibrosa. Né si potrebbe facilmente concepire altra disposizione. Se una struttura complessa deve crescere, bisogna che ciò avvenga in una unica direzione; altrimenti tutti gli organismi viventi diverrebbero tondi come palle. A tutti è certo nota la struttura fibrosa degli steli e delle foglie; noi ricaviamo il nostro fabbisogno di fibre dalle piante e intessiamo con esse funi e vestiti. Dobbiamo perciò attenderci che i raggi X rivelino la costante struttura fibrosa delle sostanze viventi, ed è quanto realmente avviene. Ricorderemo in particolare due di tali sostanze.

La prima è il cristallo di cellulosa, il costituente universale di tutti gli organismi che hanno radici nel terreno. La sua composizione chimica è nota; la disposizione dei suoi atomi e la sua struttura sono state definite nelle loro linee generali mediante una combinazione di metodi chimici e raggi X; maggiori particolari sulla precisa posizione degli atomi richiederanno ancora altro lavoro. Caratteristica essenziale è la lunga catena costituita da maglie, ciascuna delle quali è formata da un anello di cinque atomi di carbonio ed uno d'ossigeno; altra particolarità importantissima è rappresentata da un atomo di carbonio addizionale, fortemente legato ad

uno degli atomi di carbonio dell'anello, ma non incluso in quest'ultimo. Della catena fanno inoltre parte varii atomi d'ossigeno e d'idrogeno ad essa connessi in differenti punti in modo da soddisfare le esigenze chimiche. La lunghezza di ciascuna maglia si può misurare con grande esattezza; piú difficile è determinarne le dimensioni trasversali. Dal complesso delle indagini risulta comunque il sorprendente fatto che la catena è la stessa in tutta la Natura. È interessante ricercare le ragioni per cui questa peculiare disposizione atomica costituisce la base universale della vita delle piante. La questione è stata largamente studiata per via delle sue applicazioni in tutte le industrie che lavorano il cotone, le fibre artificiali ed altre strutture cellulosiche.

La seconda delle sostanze che vogliamo qui ricordare è la cheratina, la quale ha nella vita animale una parte quasi altrettanto importante quanto la cellulosa nella vita vegetale. La sua struttura ha l'aspetto di una catena a zig-zag, simile a quella di cui poche maglie sono mostrate nella fig. A di tav. XXI oppure a pag. 204; con la differenza però che ogni terzo atomo della catena è costituito da azoto invece che da carbonio e che le appendici laterali della catena possono essere assai varie. La cheratina costituisce l'elemento fondamentale dei peli, della lana, delle corna, della seta e cosí via.

Per esempio la struttura della cheratina nel cristallo di seta si può scrivere in questo modo:

Questa è una delle sue forme piú semplici: quella, come abbiamo detto, della seta naturale. Gli atomi di carbonio, disposti ad intervalli regolari, possono avere una grande varietà di appendici atomiche, da cui derivano tutte le differenti qualità di peli, lana, ecc. Lo studio di queste forme cristalline è stato vivamente perseguito nei laboratori delle industrie tessili.

Accenneremo infine brevemente anche ai progressi raggiunti nella determinazione generale della posizione e grandezza degli atomi nelle strutture cristalline. Quando incominciarono le analisi per mezzo dei raggi X era naturale di ricorrere a tutti i possibili mezzi per determinare l'architettura dei cristalli; ed in particolare si trovò utile l'ipotesi che gli atomi avessero delle determinate grandezze. Accadde sovente che la conoscenza della grandezza, quale appariva appropriata nella determinazione di una data struttura, servisse benissimo in ulteriori tentativi di soluzione. Poi comparvero delle anomalie e divenne chiaro che l'uso di simili mezzi

implicava conoscenze molto piú profonde per poter giungere alla certezza. Piú recentemente sono state trovate delle spiegazioni di tali anomalie; si è infatti potuto dimostrare ch'esse dipendono largamente dallo stato dell'atomo e dalle sue condizioni elettriche. Un atomo di carbonio possiede una certa determinata grandezza nella grafite e cosí pure in quei casi, come nella grafite, nei quali è fortemente legato a tre altri atomi di carbonio attigui (fig. A di tav. XVI). La sua grandezza è invece diversa quando, come nel diamante, esso è fortemente legato a quattro altri atomi circostanti. Spiegate le anomalie, risultò con sorpresa che la prima concezione delle grandezze atomiche era perfettamente attendibile. Prendiamo come esempio una recente determinazione della struttura dell'antracene. Le fig. 39 e 40 mostrano quanto si sapeva intorno a questa struttura quando il relativo capitolo venne scritto, alcuni anni fa. Oggi conosciamo con grande esattezza la posizione di ciascun atomo di carbonio. L'intera molecola è piatta, tutti gli atomi di carbonio trovandosi in un piano; gli esagoni sono perfettamente regolari e la lunghezza di ciascun lato è di 1,41 unità Angström, cioè di 1,41 centomilionesimi di centimetro; l'errore sperimentale viene ritenuto solo dell'uno per cento. Questa distanza fra due atomi consecutivi di carbonio è la stessa di quella negli strati atomici di grafite ed esattamen-

te la medesima che nella curiosa molecola dell'esametilbenzene, che consiste in sei atomi di carbonio uniti in anello con un gruppo CH_3 connesso a ciascun vertice. Questa molecola è strana perché, sebbene l'anello sia di forma perfetta, si associa con le sue simili a formare cristalli assai complessi. I precedenti risultati dimostrano incidentalmente che la forma piatta dell'anello benzenico in fig. B di tavola XVI è la vera quando gli anelli si riuniscono a formare strutture cristalline del tipo or ora indicato.

Ricordiamo che nel diamante la distanza fra atomo ed atomo è di 1,54 unità Angström e che l'anello che entra nella struttura del diamante è gibboso come nella fig. B 2 di tav. XVI. Questa è pure la distanza fra uno qualsiasi degli atomi di carbonio dell'anello nell'esametilbenzene e l'atomo di carbonio nel gruppo CH_3 ad esso attaccato.

Cosí l'ossatura molecolare dell'antracene è geometricamente semplice, poiché consiste di tre esagoni regolari piatti d'atomi di carbonio. Sebbene sia cosí, l'analisi con i raggi X dimostra che le molecole non sono agglomerate in modo molto semplice. Esse sono invece inclinate una rispetto all'altra e rispetto allo spigolo OC del cristallo in fig. 39 secondo un piccolo angolo, che è stato possibile misurare accuratamente. Diventa ora questione di grande interesse il determinare con maggior esattez-

za la distinzione tra le forze che legano gli atomi tra loro nella molecola e le forze che legano una molecola all'altra.

Queste sono solo alcune del gran numero di scoperte che sono state fatte con l'aiuto dei raggi X, seguendo i metodi descritti nel precedente capitolo. Esse inducono a ritenere che l'assestamento regolare degli atomi è una delle caratteristiche fondamentali dello stato solido; la sua paziente indagine ci aiuta nel tentativo di capire la natura delle cose.

Questo libro non contiene alcun riferimento alle relazioni che esistono fra materia e radiazione. Molte delle piú importanti scoperte scientifiche di questi ultimi tempi riguardano appunto tali relazioni. La loro tendenza è di abolire quella distinzione fra onde e materia, che in questi ultimi tempi è andata sempre piú svanendo. Conseguentemente un libro che si occupa della materia dovrebbe anche tener conto delle relazioni di questa con le radiazioni. Ma a ciò occorrerebbe un altro volume per cui conviene che qui si faccia punto.

FINE

«CULTURA D'OGGI»

In questa Collezione:

PAUL DE KRUIF

I CACCIATORI DI MICROBI

(seconda edizione)

Traduzione con note del
PROF. DOTT. FILIPPO USUELLI
dell'Università di Camerino

H. S. JENNINGS

EREDITÀ BIOLOGICA E NATURA UMANA

Traduzione con note del
PROF. PAOLO ENRIQUES
della R. Università di Padova

C. E. BECHHOFER ROBERTS

LA VERITÀ SULLO SPIRITISMO

Traduzione con note del
PROF. ING. MAURIZIO KORACK
del R. Politecnico di Bologna